

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika

## Modulární systém pro ověřování funkcí základních prvků výkonové elektroniky

## Modular instruments for evaluating basic circuit's elements in power electronics

Diplomová práce

Autor: **Bc. Filip Andrejs**

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Václavík

Konzultant: Ing. Martin Černík, Ph.D.

Počet stran: 70

Počet obrázků: 34

Počet příloh: 15

V Liberci 26. května 2009

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Filip ANDREJS**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Mechatronika**

Název tématu: **Modulární systém pro ověřování funkcí základních prvků výkonové elektroniky**

### **Z á s a d y   p r o   v y p r a c o v á n í :**

1. Seznamte se s aktuálním stavem výuky výkonové elektroniky v laboratořích MTI-EE. Navrhněte systém vhodných přípravků a prokonzultujte jejich využití s příslušnými pedagogy.
2. Vytvořte prototypovou sérii přípravků a po dohodě s vedoucím je otestujte při výuce. Vyhodnoťte výsledky a proveďte případné modifikace ke zlepšení užitečných vlastností.
3. Pečlivě změřte vlastnosti přípravků a vytvořte vzorové návody k jejich použití.
4. Vytvořte kompletní technickou dokumentaci potřebnou k výrobě a pozdějším modifikacím přípravků.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby dokumentace**

Rozsah pracovní zprávy: **cca 40 – 50 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná / elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Krejčířík, A.:** Napájecí zdroje I, II, III. BEN – technická literatura, Praha 1998, ISBN: 80 86056-56-2
2. **WWW stránky laboratoře pro výuku výkonové elektroniky na Arizonské univerzitě:** <http://enpub.fulton.asu.edu/PowerElectronics/>
3. **Richard C. Dorf.** The Electrical Engineering Handbook. CRC Press, 1997. 2719 s. ISBN: 08-49385-74-1
4. **Jung W. G.:** Op Amp Applications. Analog Device Inc., 2002, USA, ISBN: 0 916550 26 5

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Václavík**  
Ústav mechatroniky a technické informatiky  
Konzultant diplomové práce: **Ing. Martin Černík, Ph.D.**  
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání diplomové práce: **31. října 2008**  
Termín odevzdání diplomové práce: **29. května 2009**

prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.  
děkan

doc. Ing. Petr Tůma, CSc.  
vedoucí ústavu

V Liberci dne 31. října 2008

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 26. května 2009

Podpis:

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Janu Václavíkovi za odborné vedení diplomové práce a poskytnuté konzultace a Ing. Martinu Černíkovi, Ph.D. za poskytnuté konzultace.

V neposlední řadě děkuji svým rodičům, rodině a všem přátelům za podporu při studiu.

## **Abstrakt**

Cílem diplomové práce je vytvoření modulárního systému pro ověření funkcí základních prvků výkonové elektroniky, kompletní technické dokumentace k jeho výrobě a případným modifikacím a sestavení vzorových návodů k jeho použití.

Systém se skládá ze dvou modulů, které byly vybrány po seznámení se stavem výuky výkonové elektroniky a na základě konzultace s vyučujícím pedagogem téhož předmětu.

Základním modulem systému je generátor obdélníkového průběhu. Ten umožňuje nastavit frekvenci pulzů v rozmezí od 5 kHz do 50 kHz a střidu v rozmezí od 10 % do 90%. Základem generátoru je mikroprocesor, ten obsluhuje rotační kodér pro nastavení frekvence a střidy signálu, vytváří PWM signál a obsluhuje čtyřmístný displej pro zobrazení aktuálních hodnot frekvence a střidy. Druhou hlavní částí generátoru je hradlové pole plnící funkci dekodéru pro sedmisegmentový displej, děličky hodinového signálu použitého pro mikroprocesor. Důležitým úkolem hradlového pole je úprava PWM signálu pro režimy PUSH-PULL a HALFBRIDGE.

Druhým modulem systému je univerzální panel, na kterém lze kombinací základních komponent sestavit celkem pět typů DC/DC měničů. Tyto komponenty představují destičky plošných spojů osazené unipolárním tranzistorem, rezistorem, indukčností, diodou nebo kondenzátorem.

Technická dokumentace k výrobě modulárního systému je vytvořena v návrhovém prostředí Eagle, zdrojový kód pro mikroprocesor je napsán v jazyce C v prostředí WinAvr a program pro hradlové pole je napsán v jazyce Abel HDL v prostředí Xilinx ISE.

Část diplomové práce tvoří vzorové návody k použití jednotlivých částí systému a měření jejich vlastností.

## **Abstract**

The objective of theses is design of modular instruments for evaluating basic circuit's elements in power electronics, complete technical documentation for manufacturing and last contingent modifications and composition of example instruction manual for its using.

The modular system consists of two modules that have been chosen after identification with status of education of power electronics and after tuition with teaching educator of this subject.

The basic module of a modular system is square-wave generator. The generator makes possible to set a frequency of pulses at interval from 5 kHz to 50 kHz and pulse ratio at interval from 10 to 90 percent. The base of the generator is microprocessor which services the rotary coder for setting frequency and pulse ratio of signal, makes PWM signal and services four-digit display for depicting actual values of a frequency and pulse ratio. The second main part of generator is logic array working as a decoder for seven-segment display, a divider of a clock signal which is used for microprocessor. An important load of the logic array is a modification of PWM signal for PUSH-PULL and HALFBRIDGE modes.

The second module of system is a universal board. On this board it is possible to compile together five types of DC/DC converters by combination of basic components. These components are presented as small printed circuit boards that are settled with unipolar transistor, resistor, inductor, diode or capacitor.

Technical documentation for manufacturing of this modular system is created in a design software Eagle, a source code for the microprocessor is written in C language in WinAvr environment and a source code for the logic array is written in Abel HDL language in Xilinx ISE environment.

One part of the theses is formed by example instruction manuals for using particular parts of system and for measuring of their properties.

## OBSAH:

Seznam obrázků:	9
1 Úvod	10
2 Generátory obdélníkových pulzů	11
2.1 Analogové řešení s operačními zesilovači	11
2.1 Číslicové řešení s mikroprocesorem a PWM	12
3 Stejnosměrné měniče	14
4 Stejnosměrné měniče s indukčností	16
4.1 Snižující DC/DC měnič	16
4.2 Zvyšující DC/DC měnič	17
4.3 Invertující DC/DC měnič	18
4.4 Snižující / zvyšující DC/DC měnič	20
4.5 DC/DC měnič SEPIC	21
5 Návrh generátoru obdélníkových pulzů	22
5.1 Napájení generátoru obdélníkových pulzů	23
5.2 Funkce mikroprocesoru ATmega8	24
5.2.1 Generování obdélníkového signálu pomocí PWM	24
5.2.2 Obsluha tlačítek a LED signalizace	27
5.2.3 Obsluha rotačního kodéru	27
5.2.4 Zobrazování na LED displeji	28
5.2.5 Zdrojový kód mikroprocesoru	28
5.3 Funkce hradlového pole XC9536	29
5.3.1 Dělička kmitočtu pro mikroprocesor	29
5.3.2 Dekodér pro sedmissegmentový displej	30
5.3.3 Úprava PWM signálu	31
5.3.4 Zdrojový kód hradlového pole	33
5.4 Budič IXBD4412	33
5.5 Možnosti vylepšení generátoru	34
6 Návrh modulární stavebnice DC/DC měničů	36
6.1 Univerzální panel	36
6.2 Moduly stavebnice DC/DC měničů	37
6.2.1 Modul spínače	38
6.2.2 Univerzální modul	39
6.2.3 Modul pro připojení zátěže	40
6.2.4 Možnosti úpravy modulů	40
7 Měření sestaveného snižujícího DC/DC měniče	41
8 Závěr	45
Seznam literatury	47
Seznam příloh	49



## Seznam obrázků:

Obr. č. 1 – Zapojení generátoru obdélníkových pulzů s operačními zesilovači .....	11
Obr. č. 2 – Časový průběh pro rychlý PWM režim.....	13
Obr. č. 3 – Zapojení měniče s lineárním stabilizátorem .....	14
Obr. č. 4 – Invertující nábojová pumpa .....	15
Obr. č. 5 – Jednočinný transformátorový měnič Flyback .....	15
Obr. č. 6 – Snižující DC/DC měnič BUCK .....	16
Obr. č. 7 – Zvyšující DC/DC měnič BOOST.....	18
Obr. č. 8 – Invertující DC/DC měnič BUCK/BOOST .....	19
Obr. č. 9 – Snižující / zvyšující DC/DC měnič ČUK.....	20
Obr. č. 10 – DC/DC měnič SEPIC .....	21
Obr. č. 11 – Blokové schéma navrženého generátoru .....	22
Obr. č. 12 – Schéma zdroje pro generátor.....	23
Obr. č. 13 – Schéma měniče z -12 V na 3,3 V .....	24
Obr. č. 14 – Časový diagram rychlého PWM režimu.....	25
Obr. č. 15 – Důležité registry pro nastavení rychlého PWM režimu .....	26
Obr. č. 16 – Schéma zapojení rotačního kodéru a průběh spínání [1].....	27
Obr. č. 17 – Schéma zapojení programátoru SIProg .....	29
Obr. č. 18 – Dělička kmitočtu .....	30
Obr. č. 19 – Vnitřní zapojení LED displeje .....	30
Obr. č. 20 – Pravdivostní tabulka dekodéru.....	31
Obr. č. 21 – Průběhy signálů na výstupech generátoru .....	32
Obr. č. 22 – Schematické navržení režimu PUSH-PULL.....	32
Obr. č. 23 – Zapojení budiče IXBD 4412.....	34
Obr. č. 24 – Blokové schéma galvanického oddělení.....	35
Obr. č. 25 – Schéma univerzálního panelu .....	36
Obr. č. 26 – Plošný spoj navrženého univerzálního panelu .....	37
Obr. č. 27 – Plošný spoj navrženého modulu spínače .....	38
Obr. č. 28 – Schematické zapojení konektoru pro galvanické oddělení.....	39
Obr. č. 29 – Návrh desky plošného spoje univerzálního modulu.....	39
Obr. č. 30 – Návrh desky plošného spoje modulu pro připojení zátěže .....	40
Obr. č. 31 – Schéma měření snižujícího měniče .....	42
Obr. č. 32 – Zapojení modulů na univerzálním panelu .....	42
Obr. č. 33 – Graf výstupního napětí měniče ve spojitým módu.....	44
Obr. č. 34 – Graf výstupního napětí měniče v nespojitým módu .....	44

# 1 Úvod

Cílem diplomové práce je návrh a konstrukce modulárního systému pro ověřování funkcí základních prvků výkonové elektroniky. Tento systém bude sloužit k měření a názornému předvedení vlastností některých výkonových prvků. Inspirací návrhu modulárního systému jsou stránky Arizonské Státní Univerzity [3]. Systém se skládá ze dvou částí, generátoru obdélníkového průběhu napětí a univerzálního panelu.

Generátor je vhodné navrhnout tak, aby jeho použití nebylo omezeno pouze na aplikace spojené se zapojením na univerzálním panelu. Základními požadavky na generátor obdélníkového pulzu jsou nastavení frekvence pulzů v rozmezí od 5 kHz do 50 kHz, nastavení střídání od 10% do 90% a výstupní napětí o úrovních +12 V a -12 V.

Úkolem univerzálního panelu je možnost sestavení několika různých typů DC/DC měničů jednoduchým zapojením a uspořádáním základních prvků, kterými jsou rezistory, kondenzátory, indukčnosti a tranzistory. Požadavkem na univerzální panel je jednoduché a přehledné uspořádání jednotlivých modulů pro tvorbu měniče, možnost sestavení měničů typu BUCK, BOOST, BUCKBOOST, ČUK a SEPIC.

Nezbytnou součástí diplomové práce je kompletní technická dokumentace navrženého a zkonstruovaného generátoru i univerzálního panelu. Technická dokumentace je důležitá jak pro jejich výrobu, tak i pro případné modifikace a rozšíření modulárního systému o další moduly.

Pro využití systému ve výuce výkonové elektroniky je zapotřebí vytvořit návody a vzorové příklady pro použití generátoru a univerzálního panelu.



Frekvence pulzů je daná vztahem (1) a lze ji regulovat pomocí potenciometru R2. Amplituda trojúhelníkového signálu je daná poměrem rezistorů R3/R1. Ze vztahu pro výpočet frekvence vyplývá, že její regulace je nelineární, což v některých aplikacích způsobuje problémy. Zejména pokud chceme generátor využít jako zdroj pro měřicí úlohy ve výuce.

$$f_{out} = \frac{1}{4 \cdot R_2 \cdot C} \cdot \frac{R_1}{R_3} \quad (1)$$

Střidu signálu lze jednoduše nastavovat pomocí potenciometru R4, nebo připojením externího napětí na invertující vstup operačního zesilovače OZ3.

Mezi klady zapojení s operačními zesilovači patří jeho jednoduchost, spojitá regulace frekvence pulzů, spojitá regulace střidy pulzů, přímé řízení střidy signálu externím zdrojem napětí. Nevýhodou tohoto řešení je nutnost dalšího zařízení pro měření frekvence a střidy signálu, nelineární regulace frekvence. Další komplikace způsobuje úprava signálu pro režimy činnosti halfbridge a push-pull.

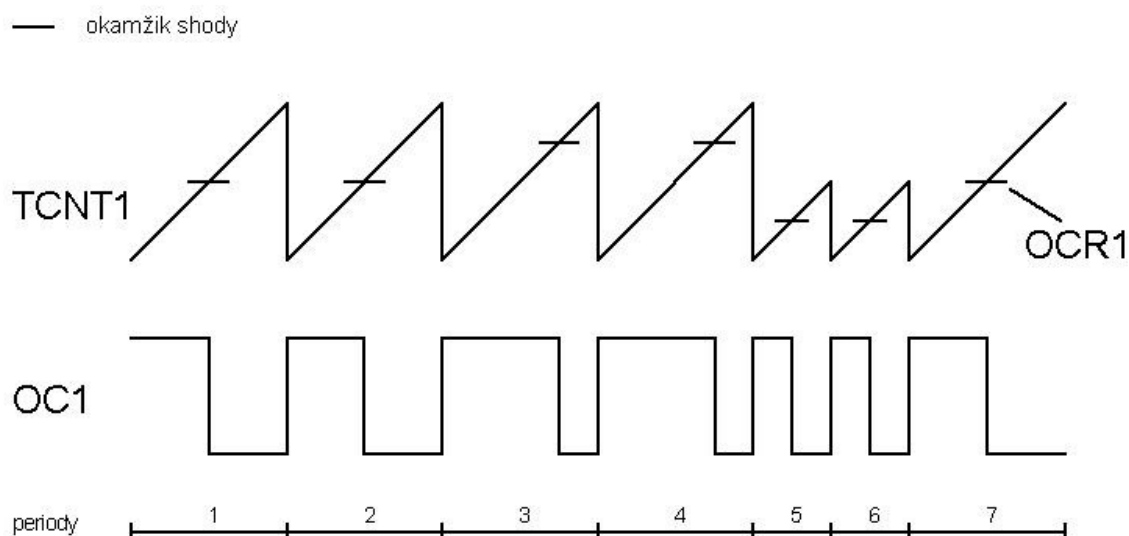
## 2.1 Číslicové řešení s mikroprocesorem a PWM

Pro širší využití generátoru obdélníkového průběhu se jako výhodnější jeví řešení zapojení s mikroprocesorem využívající ke generování signálu pulzně-šířkovou modulaci, tzv. PWM. V dnešní době je na trhu množství mikroprocesorů, které obsahují časovače pracující v režimu PWM.

Časový průběh časovače v rychlém PWM režimu je zobrazen na obrázku č. 2. Registr TCNT je neustále čítán až do dosažení maxima, následně je vynulován a čítání se opakuje. Vrchol čítače je podle nastavení módu pevně dán nebo ho může určovat hodnota vložená do registru ICR či OCR. Obsah registru TCNT je porovnáván s obsahem registru OCR. V neinvertujícím režimu je na výstupním pinu mikroprocesoru po shodě obsahů registrů TCNT a OCR log. 0. a po vynulování čítače je na tomto pinu log. 1.

Frekvence signálu je dána nastavením dělicího poměru N hodinového signálu a vrcholu čítače, její hodnotu můžeme určit podle vztahu (2). Střída signálu je závislá na

hodnotě registru OCR a můžeme ji vyjádřit jako poměr hodnoty registru OCR a vrcholu čítače.



**Obr. č. 2 – Časový průběh pro rychlý PWM režim**

$$f_{OC1} = \frac{f_{clk\_IO}}{N \cdot (vrchol + 1)} \quad (2)$$

Využití mikroprocesoru jako generátoru obdélníkového signálu má výhody v poměrně přesném nastavení frekvence a střidy signálu. Hodnoty frekvence a střidy je možné zobrazit připojením LED či LCD displeje k mikroprocesoru. K určování frekvence a střidy signálu není potřeba generátor vybavovat, či k němu připojovat, další měřicí přístroj.

Generátor využívající mikroprocesor se jeví jako univerzálnější, jelikož mikroprocesor lze využít k dalším funkcím. Například při využití sériové linky lze hodnoty frekvence a střidy nastavovat pomocí počítače. Integrovaný AD převodník lze využít k vytvoření zpětné vazby při aplikaci ve stejnosměrných měničích.

Shrneme-li vlastnosti číslicového řešení generátoru s využitím mikroprocesoru, pak mezi jeho klady patří zcela jistě jeho univerzálnost, přesnost regulace frekvence a střidy, nepotřebnost měřicího přístroje k určování hodnoty frekvence a střidy. Mezi záporné vlastnosti můžeme zařadit skokovou změnu frekvence či střidy při jejich regulaci. Zapojení generátoru s mikroprocesorem je složitější a k jeho stavbě je nezbytné vytvoření zdrojového kódu a naprogramování mikroprocesoru.

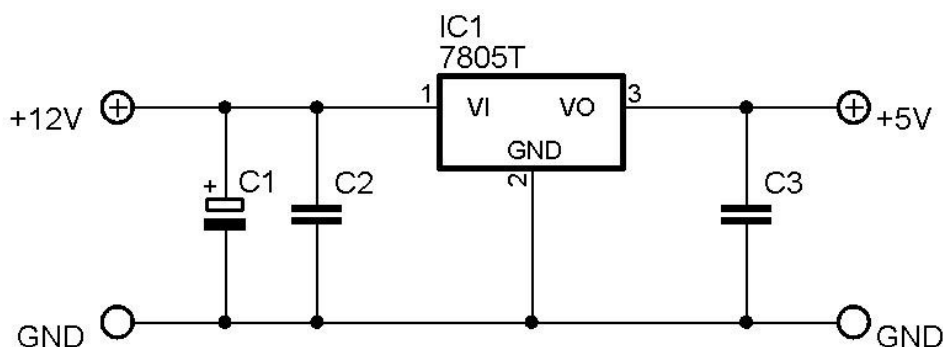
### 3 Stejnosměrné měniče

Úprava napětí je velmi důležitá pro napájení různých spotřebičů, jejich regulaci a řízení. Pokud jde o úpravu střídavého napětí s konstantní hodnotou napětí na výstupu, lze tuto transformaci provést jednoduše pomocí transformátoru, kde poměr vstupního a výstupního napětí je úměrný poměru počtu závitů na primárním a sekundárním vinutí tohoto transformátoru.

V případě, že potřebujeme upravit stejnosměrné napětí, pak lze využít stejnosměrných měničů. Pomocí těchto měničů můžeme výstupní napětí zvyšovat, snižovat či invertovat.

Pokud se budeme zabývat měniči o výstupním výkonu okolo 10 W, pak je podle principu činnosti můžeme rozdělit na měniče s lineárními obvody, měniče bez indukčnosti, měniče s cívkami a měniče s transformátory.

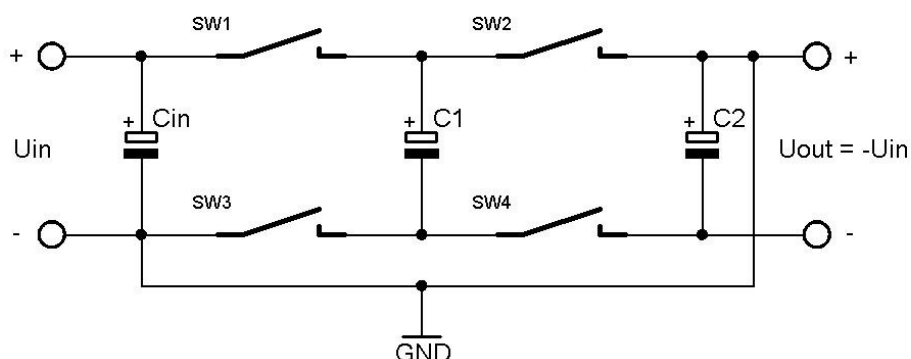
Měničem s lineárními obvody rozumíme měniče s lineárními stabilizátory. Tyto měniče umožňují pouze snižování vstupního napětí. Jejich účinnost je z principu činnosti malá a vstup s výstupem je galvanicky propojen. Využití těchto měničů je vhodné tam, kde je rozdíl mezi vstupem a výstupem malý. Na obrázku č. 3 je příklad zapojení měniče s lineárním stabilizátorem.



**Obr. č. 3 – Zapojení měniče s lineárním stabilizátorem**

Měniče bez indukčnosti využívají k přeměně napětí spínané kondenzátory. Ty jsou periodicky připojovány na zdroj napětí tak, aby tyto nabitě kondenzátory byly na výstupu řazeny do série a tím došlo k součtu jejich napětí. Těmto měničům se často říká nábojové pumpy a jsou vhodné pro aplikace s menším odběrem proudu. Používají se pro násobení a inverzi vstupního napětí, mohou generovat i více výstupních napětí

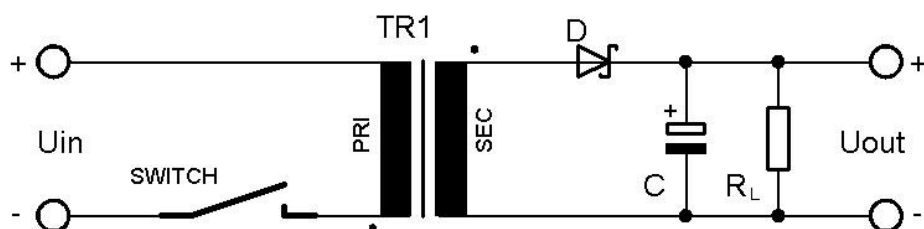
zároveň. Vstup a výstup měniče je galvanicky propojen. Jejich výhodou je jednoduchost a nízká cena. Blokové schéma invertující nábojové pumpy je na obrázku č. 4.



**Obr. č. 4 – Invertující nábojová pumpa**

Měniče s indukčností využívají ke své činnosti akumulace energie v magnetickém obvodu indukčnosti. Tyto měniče mají poměrně vysokou účinnost a umožňují vstupní napětí zvyšovat, snižovat či invertovat. Vstup a výstup měniče je vždy galvanicky propojen. Těmto měničům se více budeme věnovat v další kapitole.

Měniče s transformátory umožňují více výstupních napětí. Vstup od výstupu je možné galvanicky oddělit. Těchto obvodů se vyrábí v dnešní době mnoho typů. Měniče v blokujícím režimu využívají magnetický obvod transformátoru k akumulaci nebo k přenosu energie. Příklad měniče s transformátorem je na obrázku č. 5. Jde o jednočinný transformátorový měnič Flyback, který využívá magnetický obvod transformátoru k akumulaci energie.



**Obr. č. 5 – Jednočinný transformátorový měnič Flyback**

## 4 Stejnosměrné měniče s indukčností

Tyto měniče můžeme podle principu činnosti dělit na propustné a blokující.

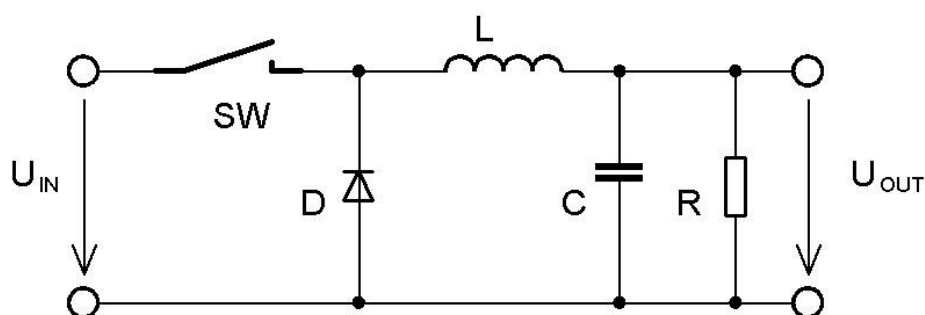
V případě propustného měniče protéká energie do spotřebiče v obou fázích pracovního cyklu. Tedy ve fázi akumulace energie do indukčnosti i ve fázi uvolňování energie z indukčnosti.

V případě blokujícího měniče ve fázi akumulace energie do magnetického obvodu indukčnosti zároveň neprotéká energie do spotřebiče. Ta protéká pouze ve fázi uvolňování z magnetického obvodu indukčnosti.

V závislosti na zatížení mohou měniče s indukčností fungovat ve dvou módech - ve spojitém nebo nespojitém módu. Při spojitém módu nedochází k poklesu proudu v induktoru na nulu. U nespojitého módu může docházet v části periody k poklesu proudu induktoru na nulu.

### 4.1 Snižující DC/DC měnič

Tento měnič slouží ke snižování napětí a napájení spotřebičů vyžadujících malé napětí. V odborné literatuře se můžeme setkat s označením BUCK nebo STEP DOWN. Základní topologii snižujícího měniče zobrazuje schéma na obrázku. Jde o propustný měnič, energie se tedy do zátěže uvolňuje v obou fázích činnosti.



Obr. č. 6 – Snižující DC/DC měnič BUCK



Ve fázi, kdy je spínač SW sepnut, dochází k akumulaci energie do indukčnosti L, proud je zároveň veden do zátěže, kondenzátor C se nabíjí. Proud touto indukčností stoupá.

Ve fázi rozepnutého spínače SW se indukčnost chová jako zdroj napětí, je na ní napětí o opačné polaritě a proud indukčností klesá. Dojde k otevření diody a proud teče do zátěže, zároveň se vybíjí kondenzátor C. Kondenzátor C tedy slouží k vyhlazení zvlnění výstupního napětí. Rezistor R představuje výstupní zátěž měniče. Blíže viz [4] a [7].

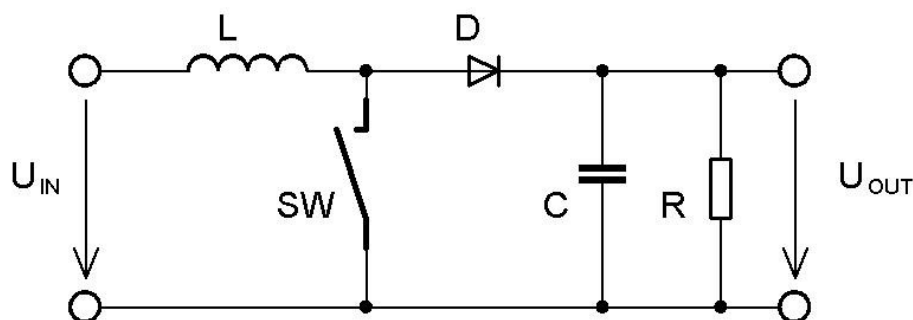
Vztah mezi vstupním a výstupním napětím měniče ve spojitém módu popisuje rovnice (3), pro nespojitý mód platí rovnice (4), kde  $t_{ON}$  je doba sepnutí spínače SW, T je perioda a D střída spínání spínače SW.

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{t_{ON}}{T} = D \quad (3)$$

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{1}{\frac{2 \cdot L \cdot I_0}{U_{IN} \cdot D^2 \cdot T} + 1} \quad (4)$$

## 4.2 Zvyšující DC/DC měnič

Použití zvyšujícího měniče je vhodné tehdy, když potřebujeme k napájení napětí vyšší, než máme k dispozici. V odborné literatuře se tyto měniče nazývají také BOOST nebo STEP UP. Základní zapojení takového měniče je na obrázku č. 7, jde o nepřímý měnič. Energie je při sepnutém spínači pouze akumulována do magnetického obvodu cívky, ale neproudí do zátěže. Do zátěže proudí energie pouze při vypnutém spínači.



**Obr. č. 7 – Zvyšující DC/DC měnič BOOST**

V případě sepnutého spínače SW je energie ze vstupního zdroje ukládána do magnetického obvodu cívky L a energii do zátěže dodává pouze nabitý kondenzátor C. Proud do cívky roste a cívka se chová jako spotřebič.

Po rozepnutí spínače je na cívkce napětí opačné polarity. Cívka se chová jako zdroj zapojený do série se vstupním zdrojem o napětí  $U_{IN}$ . Výsledkem je vyšší napětí. Dioda D je polarizována v propustném směru a energie proudí do zátěže a do kondenzátoru C, který se nabíjí. Blíže viz [4] a [7].

Vztah mezi vstupním a výstupním napětím popisují rovnice (5) a (6). Rovnice (5) platí pro spojitý mód, rovnice (6) pro nespojitý mód.

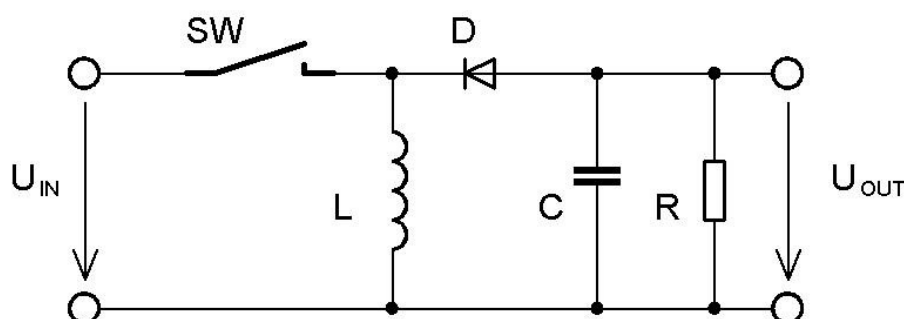
$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{1}{1 - \frac{t_{on}}{T}} = \frac{1}{1 - D} \quad (5)$$

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = 1 + \frac{U_{in} \cdot D^2 \cdot T}{2 \cdot L \cdot I_{out}} \quad (6)$$

### 4.3 Invertující DC/DC měnič

Invertující měniče mají uplatnění zejména tam, kde potřebujeme napětí opačné polarity vůči vstupnímu napětí. U invertujících měničů se také můžeme setkat s označením BUCK/BOOST. Tyto měniče můžeme například využít pro vytvoření symetrického napětí se společnou zemí pro napájení operačních zesilovačů. Schéma takového měniče je na obrázku č. 8. Jde o nepřímý měnič. V první fázi se energie pouze

akumuluje v magnetickém obvodu indukčnosti, v druhé fázi se tato energie uvolňuje do zátěže. Podle činnosti měniče v obou fázích jeho činnosti řadíme tento měnič mezi nepřímé.



**Obr. č. 8 – Invertující DC/DC měnič BUCK/BOOST**

V první fázi, kdy je sepnut spínač SW je dioda D polarizována v závěrném směru a proud teče pouze do indukčnosti, kde se energie akumuluje v jejím magnetickém obvodu. Napětí na indukčnosti má stejnou polaritu jako napájecí napětí  $U_{IN}$ . Proud do zátěže dodává po tuto dobu kondenzátor C, který se vybíjí.

Po rozepnutí spínače se na indukčnosti L objeví napětí o opačné polaritě a dioda D se polarizuje v propustném směru. Energie naakumulovaná v magnetickém obvodu cívky se uvolňuje do zátěže. Zároveň se nabíjí kondenzátor C na výstupu, který slouží k potlačení zvlnění výstupního napětí. Blíže viz [4] a [7].

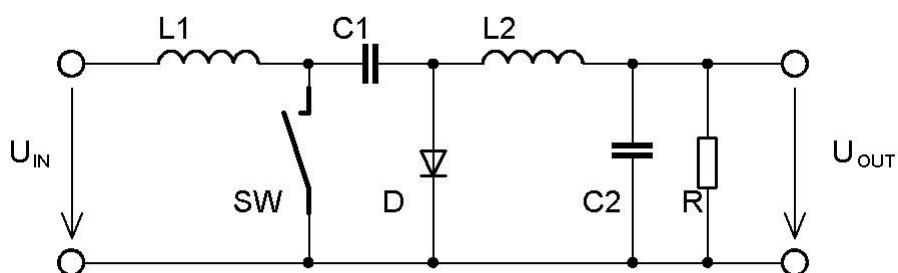
Vztah pro výpočet výstupního napětí udávají rovnice (7) a (8), kde  $D$  značí střihu spínání a je rovna poměru doby sepnutí spínače k periodě spínání. Rovnice (7) je platná pro spojitý mód, rovnice (8) pro nespojitý mód.

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = -\frac{D}{1-D} \quad (7)$$

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = -\frac{U_{in} \cdot D^2 \cdot T}{2 \cdot L \cdot I_{out}} \quad (8)$$

#### 4.4 Snižující / zvyšující DC/DC měnič

Tento typ měniče umí vstupní napětí zvyšovat i snižovat. Hlavním úkolem, který často plní, je udržení konstantního výstupního napětí. Umí ho udržovat v případě, že je vstupní napětí vyšší či nižší než požadované výstupní napětí. Jde o nepřímý měnič, výstupní zátěž není ani v jedné z pracovních fází napájen přímo ze zdroje. U těchto měničů se můžeme také setkat s označením ČUK. Schéma snižujícího / zvyšujícího měniče je na obrázku č. 9.



Obr. č. 9 – Snižující / zvyšující DC/DC měnič ČUK

V první fázi, kdy je spínač  $SW$  rozepnut, proudí energie ze zdroje a z indukčnosti  $L1$ , která se chová jako zdroj zapojený do série se vstupním zdrojem, přes diodu  $D$  do kondenzátoru  $C1$ , který se nabíjí. V druhé části obvodu dochází k přenosu energie z magnetického obvodu indukčnosti  $L2$ , která se chová jako zdroj, přes diodu  $D$  do zátěže. Zároveň je nabíjen i kondenzátor  $C2$ .

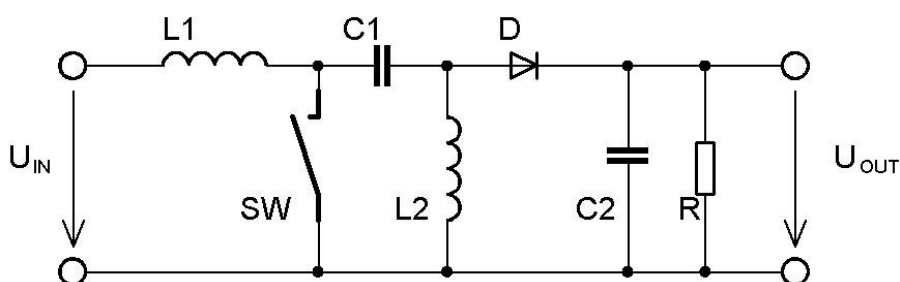
V druhé fázi, kdy je spínač  $SW$  sepnut, protéká proud ze zdroje přes indukčnost  $L1$  a do jejího magnetického obvodu se akumuluje energie. Zároveň se vybíjí kondenzátor  $C1$ . Vzniklý proud protéká do zátěže přes indukčnost  $L2$ , do které se akumuluje energie. Zároveň dochází k nabíjení kondenzátoru  $C2$ . Blíže viz [7].

Vztah pro výpočet výstupního napětí udává rovnice (8). Výstupní napětí je oproti vstupnímu invertované.

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = -\frac{D}{1-D} \quad (8)$$

## 4.5 DC/DC měnič SEPIC

Tímto typem měniče lze vstupní napětí zvyšovat, snižovat nebo udržovat na stejné hodnotě. Měnič SEPIC využívá k uložení energie kondenzátor, což umožňuje zmenšit hmotnost a objem indukčností. Drobnou nevýhodou těchto měničů je větší počet součástek. Na rozdíl od BUCK-BOOST měniče není výstupní napětí invertováno. Další výhodou měniče SEPIC je galvanické oddělení vstupu od výstupu pomocí kondenzátoru. Zapojení měniče SEPIC je na obrázku č. 10.



Obr. č. 10 – DC/DC měnič SEPIC

V první fázi, kdy je spínač SW sepnut, dochází k akumulaci energie do magnetického obvodu indukčnosti L1. Zároveň se vybíjí kondenzátor C1 a energie se akumuluje do magnetického obvodu indukčnosti L2.

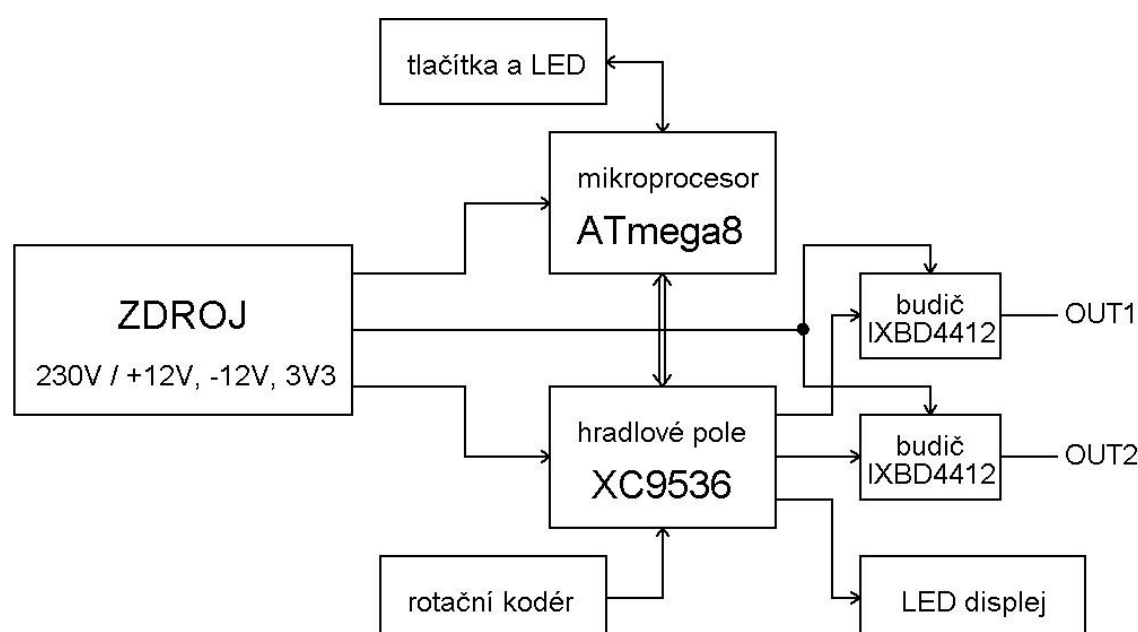
V druhé fázi se energie z indukčnosti L1 uvolňuje a nabíjí se kondenzátor C1. Do zátěže se zároveň uvolňuje energie naakumulovaná v magnetickém obvodu indukčnosti L2. Blíže viz [5].

Vztah mezi výstupním napětím  $U_{OUT}$  a vstupním napětím  $U_{IN}$  udává rovnice (9).

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{t_{on}}{T - t_{on}} \quad (9)$$

## 5 Návrh generátoru obdélníkových pulzů

Při návrhu generátoru obdélníkových pulzů jsem se ubíral směrem k číslicovému řešení s mikroprocesorem využívajícím ke generování obdélníkového průběhu pulzně šířkovou modulaci (PWM). Toto řešení má pro měření ve výuce výhody zejména v tom, že není potřeba připojovat na výstup generátoru další měřicí přístroj pro zjištění frekvence a střídy pulzů. Další výhodou je kontrolovatelná regulace střídy a frekvence pulzů, možnost volby mezi režimy PUSH-PULL a HALF-BRIDGE. Blokové schéma navrhovaného generátoru je na obrázku č. 11.



**Obr. č. 11 – Blokové schéma navrženého generátoru**

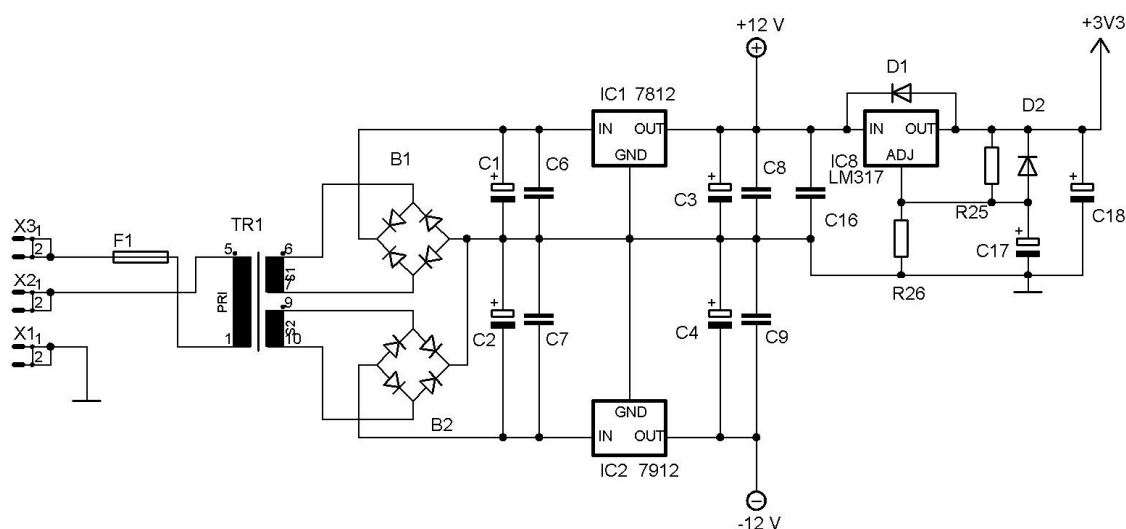
Základem zapojení je mikroprocesor ATmega 8 a hradlové pole XC9536. Mikroprocesor plní zejména funkce pro vytvoření PWM signálu, zobrazování nastavených hodnot na LED displeji a obsluhu tlačítek a signalizačních LED.

Hradlové pole plní funkce úprav signálů, jako například dekodér pro sedmisegmentový displej, úprava PWM signálu pro režimy PUSH-PULL a HALF-BRIDGE nebo děličku hodinového signálu pro mikroprocesor.

Koncovými členy generátoru jsou budiče IXBD4412, které upravují úroveň napětí generovaných signálů na průběh o špičkových hodnotách +12 V a -12 V.

## 5.1 Napájení generátoru obdélníkových pulzů

Navržený generátor potřebuje ke své činnosti napájecí napětí o úrovních +12 V, -12 V a 3,3 V. Napájení zajišťuje transformátor ze síťového napětí 230 V, 50 Hz s výstupním napětím 2 x 12 V. Tato napětí jsou dále usměrněna můstkovými usměrňovači a stabilizována lineárními stabilizátory s pevným výstupním napětím +12 V a -12 V, nakonec jsou vyhlazena pomocí kondenzátorů. Napětí o těchto úrovních jsou potřeba pouze pro výstupní budiče, veškeré ostatní obvody jsou napájeny napětím o úrovni 3,3 V. Napětí 3,3 V je vytvořeno zapojením stabilizátoru LM317, na jehož vstup je připojeno stabilizované napětí +12 V. Schéma zdroje zobrazuje obrázek č.12.

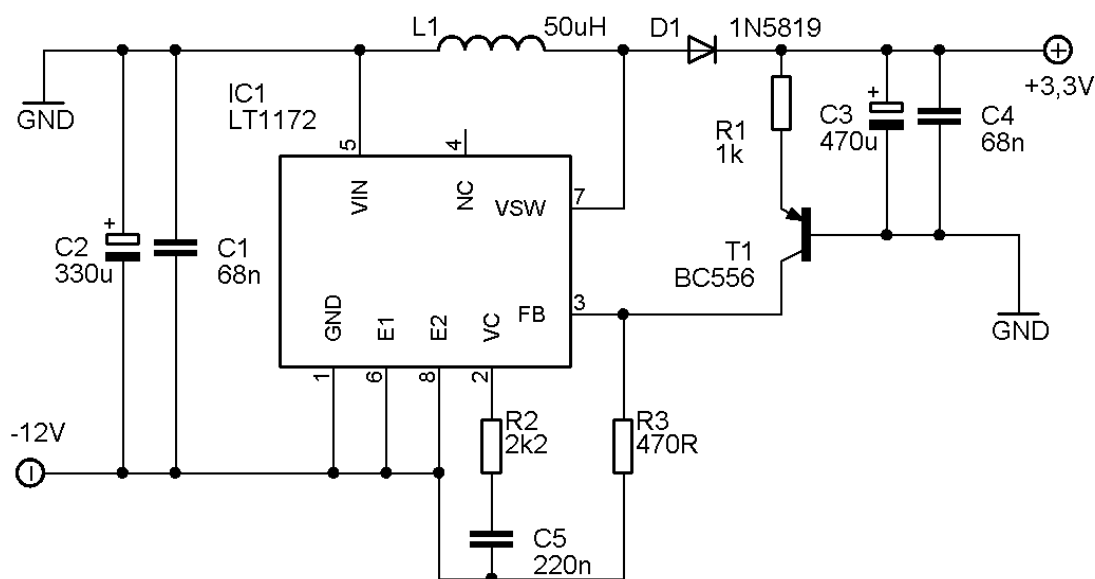


Obr. č. 12 – Schéma zdroje pro generátor

Po zapojení a oživení celého generátoru byla zjištěna menší závada, kterou způsobil větší odběr proudu ze zdroje 3,3 V. Jelikož je napětí 3,3 V získáno stabilizací z napětí +12 V, docházelo k poklesu napětí z 12 V na napětí kolem 5 V. Řešením by byla výměna transformátoru s větším výkonem, to by však znamenalo úpravu desky plošných spojů, z důvodu větších rozměrů transformátoru.

Konečným řešením byl návrh snižujícího invertujícího měniče LT1172 [9], který byl zapojen na stabilizované napětí -12 V. Toto zapojení má výhodu nejen v tom, že zdroj záporného napětí -12 V je méně zatěžován, ale i v tom, že účinnost měniče je větší než účinnost stabilizace z 12 V na 3,3 V pomocí stabilizátoru LM317. Schéma

navrženého měniče je na obrázku č. 13. S touto úpravou je potřeba počítat při další výrobě generátoru.



Obr. č. 13 – Schéma měniče z -12 V na 3,3 V

## 5.2 Funkce mikroprocesoru ATmega8

Mikroprocesor ATmega8–16AU je hlavním mozkiem generátoru, který pomocí čítače v rychlém PWM režimu vytváří napětí obdélníkového průběhu. Dalším jeho úkolem je obsluha tlačítka pro volbu mezi režimy HALF-BRIDGE a PUSH-PULL a jejich indikaci pomocí dvou LED diod. Mikroprocesor vyhodnocuje stav a směr otáčení rotačního kodéru, který slouží k nastavování hodnot frekvence a střídy signálu. Dalším z úkolů, jenž mikroprocesor plní, je funkce pro zobrazení nastavených hodnot frekvence a střídy na čtyřmístném sedmisegmentovém LED displeji.

### 5.2.1 Generování obdélníkového signálu pomocí PWM

Čítače/časovače s funkcí PWM jsou součástí mnoha mikroprocesorů, nebylo tedy nutné samotný PWM generátor konstruovat a využila se tato funkce zvoleného mikroprocesoru.

Generování obdélníkového signálu zajišťuje rychlý PWM režim (označovaný též jako fast PWM) čítače/časovače 1. V rychlém režimu PWM čítač čítá od nuly až do

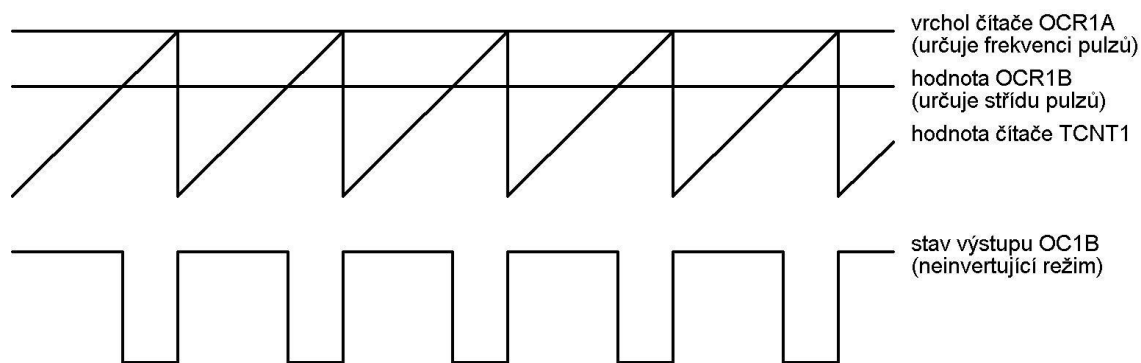


vrcholu, následně se čítač vynuluje a čítá se znovu od nuly do vrcholu. Hodnota čítače je neustále porovnávána s obsahem registru OCR1A nebo OCR1B. V případě shody dojde v neinvertujícím režimu k nastavení příslušného výstupu na log. 0, při dosažení čítače vrcholu dojde k nastavení na log. 1.

Čítač/časovač 1 má celkem dva kanály, což umožňuje nastavit střídu i frekvenci obdélníkového signálu. Rychlý PWM režim lze nastavit pomocí bitů WGM10, WGM11, WGM12 a WGM13. V rychlém PWM režimu lze tyto bity nastavit na hodnoty 5, 6, 7, 14 nebo 15, rozdíl mezi nastavením je ve velikosti vrcholu čítače. V našem zapojení je zvolena hodnota 15, všechny bity WGM jsou nastaveny na log. 1.

Nastavení WGM na hodnotu 15 umožňuje volbu vrcholu čítače pomocí registru OCR1A. Hodnotou OCR1A tedy lze nastavovat frekvenci PWM signálu. Pokud je WGM nastaveno na hodnotu 15, nelze využít ke generování PWM signálu kanál A. Proto musí být využit kanál B. V tomto případě lze měnit střídu signálu a to za pomoci registru OCR1B.

Na obrázku č. 14 je časový průběh generování obdélníkového signálu pomocí rychlého PWM režimu. Popis registrů a jejich bitů, které je potřeba nastavit, je na obrázku č. 15.



**Obr. č. 14 – Časový diagram rychlého PWM režimu**

K nastavení rychlého PWM režimu čítače/časovače 1 jsou potřeba celkem tři registry. V registru TIMSK je potřeba nastavit bity OCIE1A a OCIE1B na log. 1, což povolí přerušování při shodě čítače TCNT1 a OCR1A, resp. OCR1B.

K dalšímu nastavení slouží registry TCCR1A a TCCR1B. V těchto registrech musíme nastavit především bity COM1B1 a COM1B0. Nastavením těchto bitů určujeme jak se bude chovat výstup, zda bude v invertovaném nebo neinvertovaném

režimu, tedy zda při shodě TCNT1 a OCR1B bude na výstupu log.0 nebo log. 1. Bity FOC1A a FOC1B musí být v PWM režimu nastaveny na log.0. Bity WGM10 až WGM13 nastavíme do log.1, tím určíme, že jde o rychlý PWM režim a že vrchol čítače je určen hodnotou registru OCR1A. Bity CS10, CS11 a CS12 určují, kolikrát bude hodinový signál mikroprocesoru dělen pro čítač. V našem případě byla zvolena hodnota 1 a bity CS11 a CS12 jsou nastaveny na log. 0 a bit CS12 na log. 1. Hodinový signál pro čítač je tedy shodný s hodinovým signálem mikroprocesoru. Bit ICNC1 slouží k potlačování šumu jednotky IC. Bit ICES1 slouží k výběru hrany pro jednotku IC. Blíže viz [2] a [10].

TCCR1A

7	6	5	4	3	2	1	0
COM1A1	COM1A0	COM1B1	COM1B0	FOC1A	FOC1B	WGM11	WGM10

TCCR1B

7	6	5	4	3	2	1	0
ICNC1	ICES1	-	WGM13	WGM12	CS12	CS11	CS10

TIMSK

7	6	5	4	3	2	1	0
OCIE2	TOIE2	TICIE1	OCIE1A	OCIE1B	TOIE1	OCIE0	TOIE0

**Obr. č. 15 – Důležité registry pro nastavení rychlého PWM režimu**

Frekvence obdélníkového signálu vytvořená rychlým PWM režimem čítače/časovače 1 je dána rovnicí (10).

$$f = \frac{f_{clk\_uP}}{N \cdot (vrchol + 1)} = \frac{12 \cdot 10^6}{1 \cdot (OCR1A + 1)} \quad (10)$$

Úpravou ve zdrojovém kódu lze volit frekvenci pulzů výpočtem OCR1A z frekvence nebo z periody. Původní výpočet OCR1A z frekvence byl nahrazen výpočtem z periody, což umožňuje namísto lineárního nastavování frekvence lineárně nastavovat periodu. Hodnota OCR1B, která slouží k nastavování střídý signálu je procentuelně vypočtena z hodnoty OCR1A.

## 5.2.2 Obsluha tlačítek a LED signalizace

Mikroprocesor ATmega8 obsluhuje dvě tlačítka. Prvním tlačítkem volíme mezi režimy PUSH-PULL a HALFBRIDGE, výběr režimu signalizují dvě LED diody připojené též k mikroprocesoru. Výběr režimu je také poslán signálem do hradlového pole, které zajišťuje úpravu PWM signálu do daného režimu.

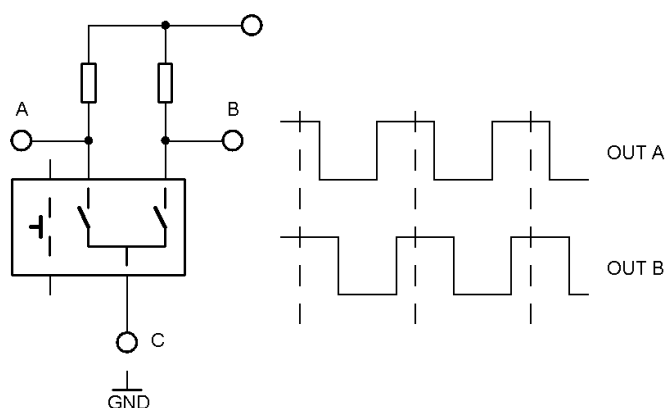
Druhým tlačítkem, které je součástí rotačního kodéru, volíme mezi zobrazováním hodnoty frekvence a střidy na LED displeji.

## 5.2.3 Obsluha rotačního kodéru

Rotační kodér je složen ze dvou spínačů, které jsou fázově posunuty a při otáčení se střídavě spínají a rozpínají. Schéma a průběh spínání jednotlivých spínačů je na obrázku č. 16.

Úkolem mikroprocesoru je vyhodnocení polohy kodéru a směr otočení oproti předchozí poloze. Tuto funkci mělo původně zastávat hradlové pole, jelikož bylo zvolené hradlové pole malé a zdrojový kód se do něho nevešel, byla tato funkce přidělena mikroprocesoru, na který se signály z rotačního kodéru přímo propojily přes hradlové pole.

Při otáčení kodérem dochází k inkrementaci nebo dekrementaci proměnné pro nastavení střidy nebo frekvence podle toho, která z proměnných je aktuálně nastavena pro zobrazení na LED displeji. Krok inkrementace a dekrementace je pevně daný a je různý pro frekvenci a střidu.



**Obr. č. 16 – Schéma zapojení rotačního kodéru a průběh spínání [1]**

### 5.2.4 Zobrazování na LED displeji

Nastavenou frekvenci a střidu je možné zobrazit na čtyřmístném sedmi-segmentovém LED displeji. První pozice displeje signalizuje, o jakou zobrazovanou hodnotu jde. Písmeno F určuje, že jde o frekvenci, písmeno P určuje, že jde o střidu. Písmeno P bylo zvoleno pro jeho možnost zobrazení a odlišení od číslic na displeji. Zároveň je to odvozeno od anglického pulse ratio.

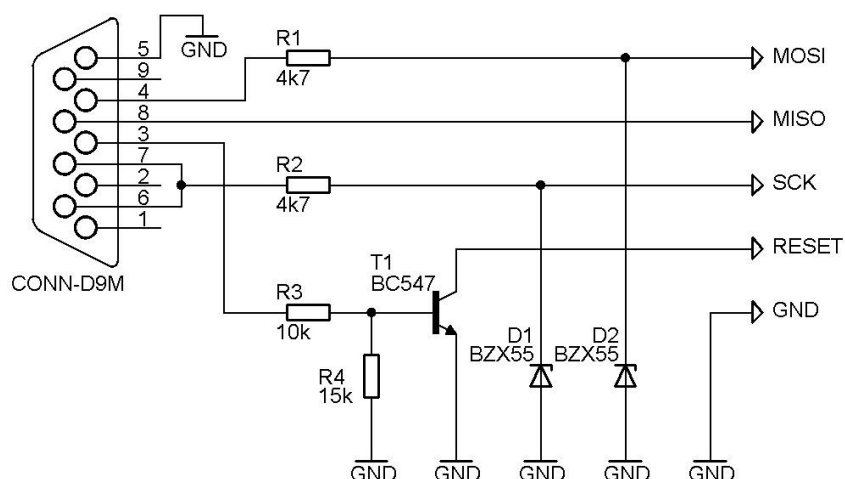
Displej není připojen přímo k mikroprocesoru, je připojen k hradlovému poli, které plní úkol dekodéru jak pro jednotlivé segmenty, tak i adresového dekodéru pro jednotlivé sedmisegmentovky. Na displeji nelze zobrazovat současně všechny číslice, jednotlivé sedmisegmentovky musejí být cyklicky rozsvíceny. Toto postupné zobrazování je velmi rychlé, proto se to na displeji jeví, jakoby všechna čísla svítila současně, ve skutečnosti svítí v jeden okamžik pouze jedno číslo.

Hodnota čísla je předávána pomocí čtyř výstupů mikroprocesoru hradlovému poli k dekódování. Hodnoty 0 až 9 představují čísla, hodnota 10 pak písmeno F a hodnota 11 písmeno P. Další dva výstupy slouží k adresaci právě rozsvícené sedmisegmentovky.

### 5.2.5 Zdrojový kód mikroprocesoru

Nezbytnou součástí diplomové práce je vytvoření zdrojového kódu mikroprocesoru ATmega8-16AU pro obsluhu připojených obvodů. Tento zdrojový kód je napsán v jazyce C v prostředí AVR Studio 4, které je volně dostupné na stránkách firmy ATMEL, výrobce použitého mikroprocesoru. AVR Studio 4 také umožňuje simulaci vytvořeného programu, což podstatně urychluje práci při odstraňování chyb ve zdrojovém kódu.

Přeložený kód byl naprogramován softwarem PonyProg2000, ten je volně k dispozici na stránkách firmy Lancos. Uložení programu do paměti mikroprocesoru bylo provedeno jednoduchým ISP programátorem přes sériové rozhraní počítače. Schéma zapojení programátoru je na obrázku č. 17.



**Obr. č. 17 – Schéma zapojení programátoru SIProg**

### 5.3 Funkce hradlového pole XC9536

Hradlové pole XC9536 je druhý základní obvod navrženého generátoru. Obvod plní funkci dekodéru pro sedmisegmentový displej a adresového dekodéru pro rozsvěcení jednotlivých sedmisegmentovek. Jednou z funkcí pole je dělička hodinového kmitočtu pro mikroprocesor. Hradlové pole XC9536 je hlavně použito pro úpravu PWM signálu a vytvoření režimů PUSH-PULL a HALFBRIDGE.

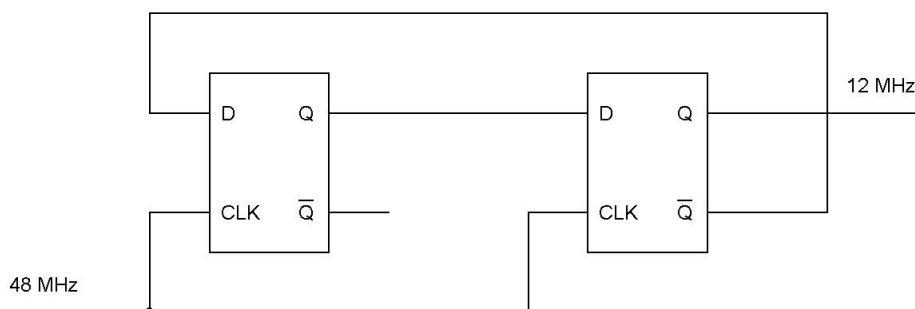
Hradlové pole mělo původně plnit více funkcí, bohužel při tvorbě zdrojového kódu bylo zjištěno, že hradlové pole je příliš malé. Z tohoto důvodu byla část funkcí přesunuta do mikroprocesoru. Základní zapojení hradlového pole viz [13].

#### 5.3.1 Dělička kmitočtu pro mikroprocesor

Využití hradlového pole pro funkci děličky hodinového signálu má výhodu v ušetření dalších součástek potřebných k vytvoření hodinového signálu mikroprocesoru. Zároveň jsou mikroprocesor a hradlové pole spolu synchronizovány.

Oscilátor připojený k hradlovému poli, který slouží jako jeho hodinový signál, má kmitočet 48 MHz. Mikroprocesor při napájecím napětí 3,3 V může mít zdroj hodinového signálu o maximální frekvenci 12 MHz. Frekvence oscilátoru tedy musí být dělena čtyřmi.

Zdrojový kód děličky kmitočtu je odvozen od zapojení dvou D klopných obvodů. Schéma děličky čtyřmi pomocí D klopných obvodů je na obrázku č. 18.



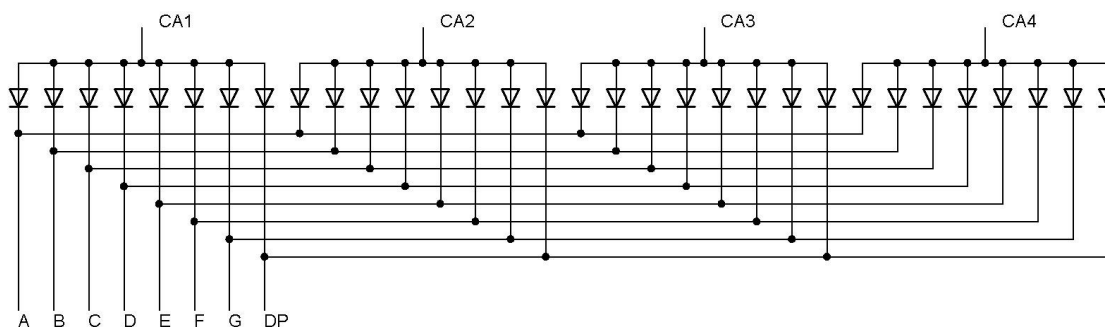
**Obr. č. 18 – Dělička kmitočtu**

### 5.3.2 Dekodér pro sedmissegmentový displej

V zapojení generátoru je pro zobrazení aktuální hodnoty frekvence nebo střidy použit čtyřmístný sedmissegmentový LED displej. Schématické zapojení LED displeje je na obrázku č. 19. Využití hradlového pole pro funkci dekodéru pro displej má výhodu v ušetření výstupních pinů mikroprocesoru. Tento LED displej má celkem 8 vývodů pro jednotlivé segmenty a tečku a čtyři vývody pro společné anody jednotlivých pozic.

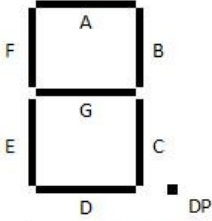
Zobrazované číslice je možno mikroprocesorem posílat hradlovému poli pouze čtyřmi signály, k výběru pozice na displeji postačí dva signály. Tabulka dekódování signálu z mikroprocesoru na LED displej je na obrázku č. 20.

Tečky na displeji, z nichž jedna plní funkci desetinného oddělovače a druhá plní funkci oddělení indikace zobrazované veličiny od samotné hodnoty, mají pevně danou pozici a jsou rozsvíceny podle adresované pozice na LED displeji.



**Obr. č. 19 – Vnitřní zapojení LED displeje**

číslo	vývody uP				vývody displeje							symbol
	D1	D2	D3	D4	A	B	C	D	E	F	G	
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1
2	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	2
3	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	3
4	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	4
5	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	5
6	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	6
7	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	7
8	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	8
9	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	9
10	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	F
11	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	P



vývody uP		vývody displeje				
A1	A2	CA1	CA2	CA3	CA4	DP
0	0	0	0	0	1	0
0	1	0	0	1	0	1
1	0	0	1	0	0	0
1	1	1	0	0	0	1

Obr. č. 20 – Pravdivostní tabulka dekodéru

### 5.3.3 Úprava PWM signálu

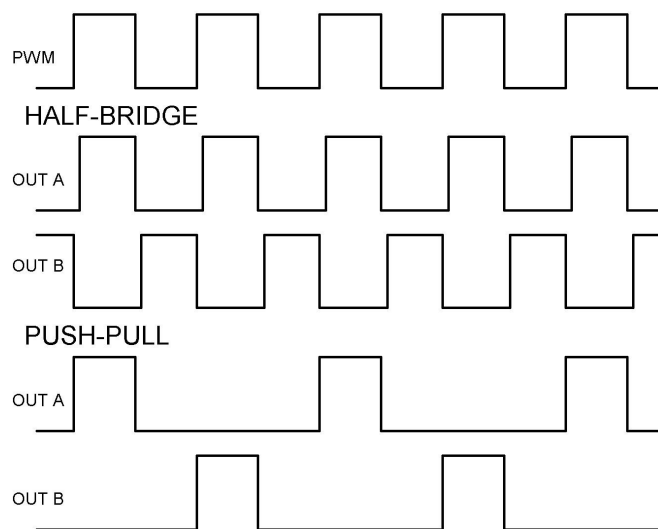
Hlavním důvodem zapojení hradlového pole do generátoru obdélníkového průběhu napětí byla možnost pomocí programu upravit PWM signál vycházející z mikroprocesoru. V případě, že bychom chtěli signál upravovat pomocí analogových součástek, vedlo by to k navýšení počtu těchto součástek.

Při úpravě PWM signálu plní pole funkce pro vytvoření režimů PUSH-PULL a HALF-BRIDGE, dále pak v režimu HALF-BRIDGE plní funkci časového zpoždění náběžné hrany signálu. Zpoždění náběžné hrany signálu je potřeba k tomu, aby nedošlo k současnému sepnutí obou tranzistorů připojených na výstupy generátorů, což by vedlo ke krátkodobému zkratu. Průběh signálů na obou výstupech v těchto režimech ukazuje obrázek č. 21.

Režim HALF-BRIDGE lze vytvořit jednoduše, první výstup je totožný se vstupním signálem PWM, druhý výstup je jen jednoduše invertovaný. V případě, že na výstupy připojíme tranzistory jako spínače, nastane problém při vypínání prvního a následném sepnutí druhého, to se děje v jednom okamžiku. Vypnutí tranzistoru není okamžité, což by mohlo vést ke zkratu. Z tohoto důvodu musí být tento režim ošetřen tak, aby mezi vypnutím prvního tranzistoru a sepnutím druhého tranzistoru byla časová prodleva.

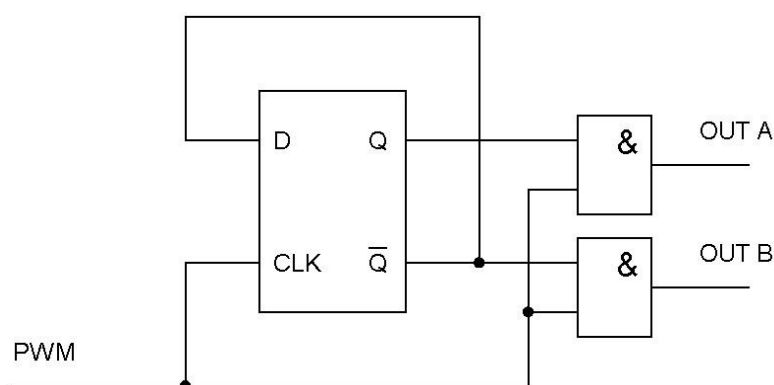
Tato prodleva je vždy při náběžné hraně jednotlivých výstupů, takže před nastavením výstupu do log. 1 jsou vždy oba výstupy v log. 0. Časové zpoždění náběžné hrany je vytvořeno pomocí čítače, který pokud nenačítá do určité hodnoty, nedojde

k překlopení daného výstupu do log. 1. Časové zpoždění před náběžnou hranou je nastaveno přibližně na 200 ns.



**Obr. č. 21 – Průběhy signálů na výstupech generátoru**

Vytvoření režimu PUSH-PULL je o něco jednodušší, protože zde není potřeba vytvářet žádné časové zpoždění náběžné hrany. Tento režim je vytvořen na základě děličky kmitočtu. Vstupní PWM signál se dělí děličkou dvěma a výstup z děličky je porovnáván ještě s PWM signálem, aby v případě PWM signálu v log. 0 byl i výstupní signál v log. 0. Schematické navržení řešení tohoto režimu, ze kterého vycházel program pro hradlové pole je na obrázku č. 22.



**Obr. č. 22 – Schematické navržení režimu PUSH-PULL**



### 5.3.4 Zdrojový kód hradlového pole

Nedílnou součástí diplomové práce je vytvoření zdrojového kódu pro hradlové pole XC9536. Tento zdrojový kód je napsán v jazyku Abel HDL v programu Xilinx ISE, který je volně dostupný na stránkách výrobce hradlového pole, Xilinx.

Zdrojový kód byl skládán postupně z jednotlivých funkcí a odlaďován přímo na zapojeném hradlovém poli v generátoru. Přeložený a zkompileovaný zdrojový kód byl nahrán do pole pomocí stejného programu Xilinx ISE a pomocí převodníku USB – JTAG od firmy Xilinx.

## 5.4 Budič IXBD4412

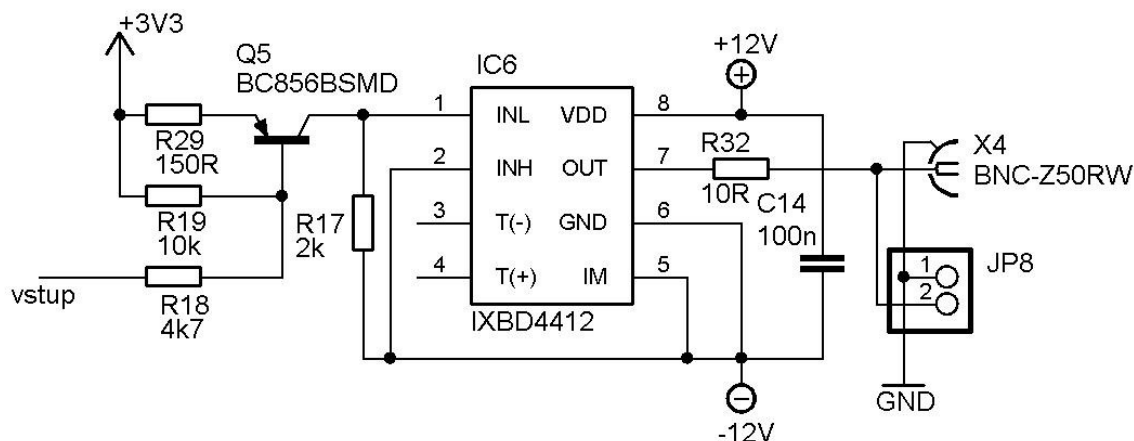
Jedním z požadavků na generátor obdélníkového průběhu napětí bylo symetrické výstupní napětí o úrovních  $\pm 12$  V. K vytvoření tohoto výstupního signálu byl využit budič IXBD4412 [6]. Důvodem použití tohoto budiče byla jeho dostupnost ze školních zásob. Zvolení budiče IXBD4412 vedlo k úpravě jeho zapojení, jelikož tento budič není přímo určen pro výstupní signál o symetrických úrovních napětí. Zejména musel být vytvořen obvod posunu úrovně pro vstup a muselo být upraveno napájení tohoto budiče.

Tento budič je koncovým prvkem generátoru obdélníkového průběhu napětí a slouží k posílení výstupu a zároveň z výstupního signálu hradlového pole o napěťové úrovni 0 až 3,3 V vytváří, spolu s doplňujícím obvodem pro vytvoření posunu úrovně pro vstup, signál o úrovni +12 V a -12 V.

Maximální vstupní napětí budiče je 24 V, čehož je v našem zapojení využito. Budič je zapojen na napětí +12 V, zem budiče není zapojena se zemí celého obvodu generátoru, ale je připojena na napětí -12 V. Tímto zapojením tedy dosáhneme toho, že na výstupu budeme mít signál o úrovních +12 V a -12 V.

Pro tento způsob zapojení budiče musí být upraven signál vstupující do budiče. Ten je upraven pomocí tranzistoru, který při log. 0 přivádí na vstup budiče -12 V a při log. 1 na vstup přivádí +3,3 V.

Výstup budiče je ošetřen odporem  $10\ \Omega$  zapojeným do série s výstupním konektorem. Schéma zapojení budiče je na obrázku č. 23. V zapojení generátoru jsou celkem dva budiče, z nichž každý upravuje výstupní napětí jednotlivých výstupů.



**Obr. č. 23 – Zapojení budiče IXBD 4412**

## 5.5 Možnosti vylepšení generátoru

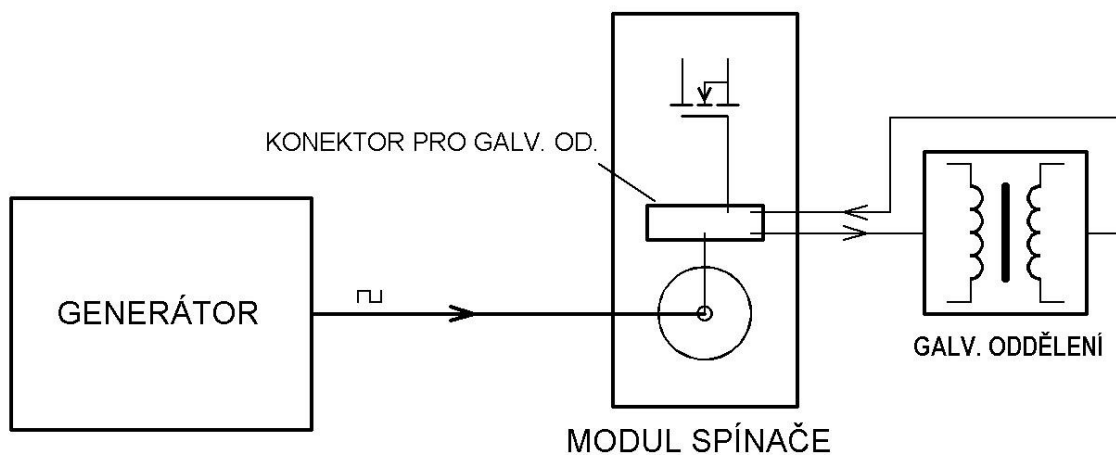
Navržený generátor je funkčním vzorkem, který je možno v budoucnu dále rozšiřovat a upravovat. Jednou z možností úpravy je připojení generátoru přes sériové rozhraní k počítači. Toto spojení by například umožňovalo nastavování či měření frekvence a střidy přes sériové rozhraní pomocí počítače a příslušného programu. Pro takové využití je již připraven konektor pro sériovou linku mikroprocesoru, tedy signály Rx a Tx. K plné funkčnosti je potřeba upravit zdrojový kód mikroprocesoru a vytvořit galvanické oddělení sériové linky.

Dalším tipem, jak navržený generátor vylepšit, je využití AD převodníku mikroprocesoru k měření. Měřenou veličinou by například mohlo být výstupní napětí měniče připojeného ke generátoru, což by šlo využít jako zpětnou vazbu k udržení jeho konstantní hodnoty. Při návrhu generátoru nebylo toto využití bráno v úvahu, proto není připraven konektor pro připojení AD vstupů a referenčního napětí. Piny mikroprocesoru potřebné k funkci integrovaného AD převodníku jsou však volné a nezapojené.

Důležitou součástí, kterou by bylo vhodné vylepšit generátor, je galvanické oddělení výstupu. V navrženém generátoru je výstup budiče připojen ke konektoru přes rezistor o odporu  $10\ \Omega$ , čímž je pouze budič chráněn proti zkratu na výstupu. Připojený

měníč však není galvanicky oddělen od generátoru. Galvanické oddělení se pouze přemístilo z prostoru generátoru a u modulu tranzistoru pro měniče byl vytvořen konektor, na kterém lze tento tranzistor pomocí propojek připojit přímo ke generátoru, nebo lze vytvořit obvod galvanického oddělení a připojit ho k tomuto konektoru.

Blokové schéma připojení obvodu pro galvanické oddělení generátoru od modulu spínače pro zapojení DC/DC měniče je na obrázku č. 24.



**Obr. č. 24 – Blokové schéma galvanického oddělení**

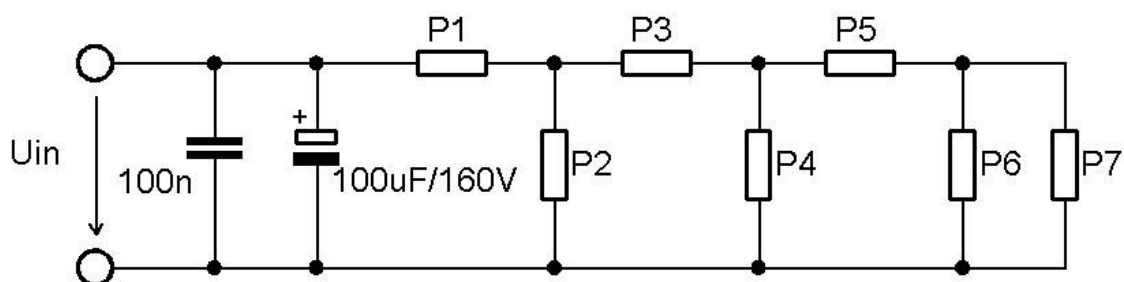
## 6 Návrh modulární stavebnice DC/DC měničů

Návrh stavebnice vychází z topologií jednotlivých DC/DC měničů s indukčností. Vzhledem k podobě jejich zapojení byl navržen univerzální panel, na kterém lze sestavit celkem pět typů DC/DC měničů.

Stavebnice se skládá z univerzálního panelu a z modulů, které je možné osadit základními součástkami DC/DC měničů. Těmito součástkami jsou diody, rezistory, tlumivky nebo kondenzátory.

### 6.1 Univerzální panel

Univerzální panel umožňuje zapojení základních DC/DC měničů s indukčností, kterými jsou snižující, zvyšující a invertující měnič, snižující a zvyšující měnič ČUK a měnič SEPIC. Schéma univerzálního panelu zobrazuje schéma na obrázku č. 25. Prvky  $P_1$  až  $P_7$  představují součástky, které jsou uvedeny v tabulce č. 1 podle typu sestavovaného měniče.



Obr. č. 25 – Schéma univerzálního panelu

typ měniče	Prvky						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
snižující (BUCK)	spínač	D	L	C	zkrat	0	R
zvyšující (BOOST)	L	spínač	D	C	zkrat	0	R
invertující (BUCK/BOOST)	spínač	L	D	C	zkrat	0	R
snižující/zvyšující (ČUK)	L1	spínač	C1	L2	D	C2	R
SEPIC	L1	spínač	C1	D	L2	C2	R

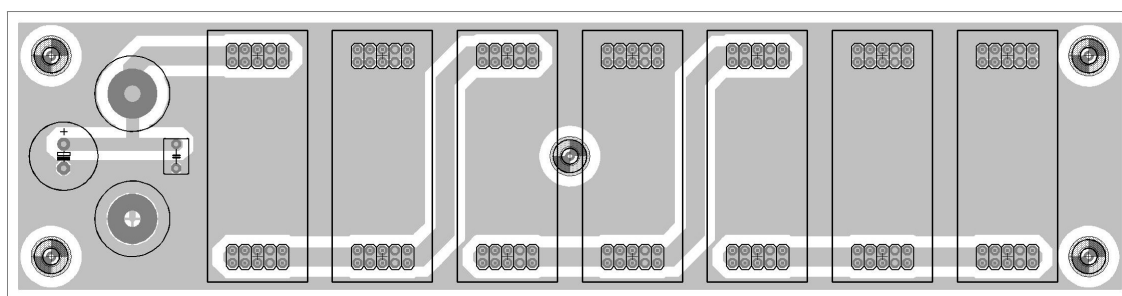
spínač - modul s unipolárním tranzistorem, L - indukčnost, C - kondenzátor, D - dioda,  
R - zátěž, 0 - nezapojeno, zkrat – propojeno

Tab. č. 1 – Řazení součástek podle typu měniče

Vstupní napětí na panel je přivedeno přes banánkové konektory, na vstupu panelu jsou dva kondenzátory pro vyhlazení zvlnění vstupního napětí. Vstupní napětí univerzálního panelu je omezeno napětím, které je určeno parametrem elektrolytického kondenzátoru a jeho maximální velikost je 160 V.

Jednotlivé moduly je možné připojit k univerzálnímu panelu pomocí dutinových konektorů. Na panelu jsou umístěny samice o rozměrech 2 x 5 pinů. Plošný spoj je navržen v prostředí Eagle 4.15 a jednotlivé cestičky jsou navrženy v dostatečné šíři pro průchod větších proudů. Návrh desky plošného spoje s rozmístěním prvků je na obrázku č. 26.

Univerzální panel byl navrhován s ohledem na rozměry desky a snahou bylo vytvořit desku s co nejvyšším využitím místa. Vznikl úzký a dlouhý panel, na kterém jsou jednotlivé moduly připojovány vedle sebe. Výhodou tohoto návrhu je využití desky při výrobě a ušetření nákladů na výrobu.



**Obr. č. 26 – Plošný spoj navrženého univerzálního panelu**

Při zapojování a měření měniče na tomto přípravku bylo zjištěno, že by bylo výhodnější univerzální panel navrhnout blíže topologii měničů (viz. obr. č. 25). Tento návrh by pro studenty byl jistě přehlednější, čímž by se snížila pravděpodobnost chybného zapojení. Nevýhodou by byly větší rozměry univerzálního panelu a tím i větší spotřeba materiálu při výrobě.

## **6.2 Moduly stavebnice DC/DC měničů**

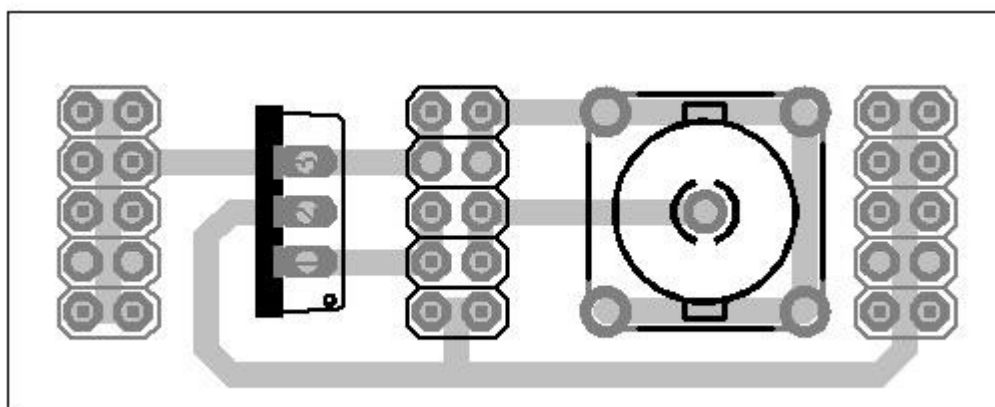
Jednotlivé moduly pro stavbu měničů na univerzálním panelu mají jednotné rozměry. Rozměry těchto modulů byly navrženy z hlediska snadného skladování. Rozměry desky plošného spoje všech modulů jsou 20 x 50 mm. Navrženy byly celkem tři typy modulů. Prvním z nich je modul spínače, dalším je univerzální modul pro

osazení většiny součástek, posledním typem je modul osazený banánkovými konektory pro připojení zátěže.

### 6.2.1 Modul spínače

Modul spínače je osazen unipolárním tranzistorem P14NF10 o maximálním napětí  $U_{DS} = 100 \text{ V}$  a maximálním proudu  $I_D = 15 \text{ A}$ . Maximální ovládací napětí  $U_{GS} = \pm 20 \text{ V}$ . Tento tranzistor je umístěn v pouzdře TO220 a je umístěn tak, aby v případě nutnosti na něj mohl být připevněn chladič.

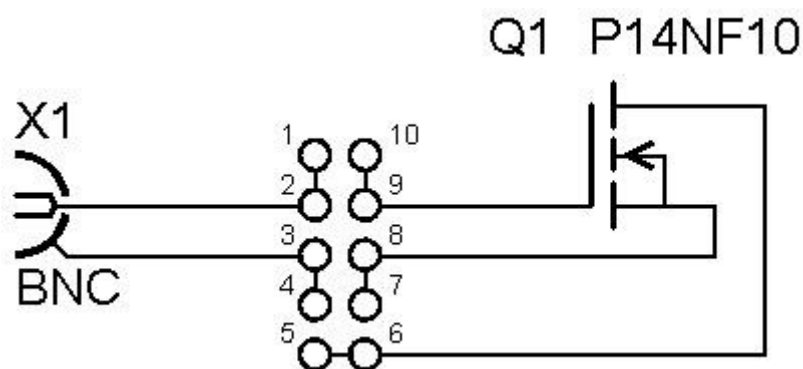
Vstupní napětí na něj je přivedeno přes BNC konektor, tento modul lze připojit přímo k navrženému generátoru obdélníkového průběhu napětí, který má výstupní napětí o úrovni  $\pm 12 \text{ V}$ . Návrh desky plošného spoje modulu spínače je na obrázku č. 27.



**Obr. č. 27 – Plošný spoj navrženého modulu spínače**

Modul je osazen celkem třemi konektory, z nichž dva krajní slouží k připojení modulu na univerzální panel, tyto konektory jsou osazeny na opačné straně desky, než jsou umístěny ostatní součástky. Třetí konektor umístěný mezi tranzistorem a BNC konektorem je připraven pro připojení obvodu pro galvanické oddělení generátoru od měniče. Pokud nebude využit obvod pro galvanické oddělení, lze připojit tranzistor ke generátoru pomocí propojek přímo. Podrobnější popis konektoru je na obrázku č. 28.

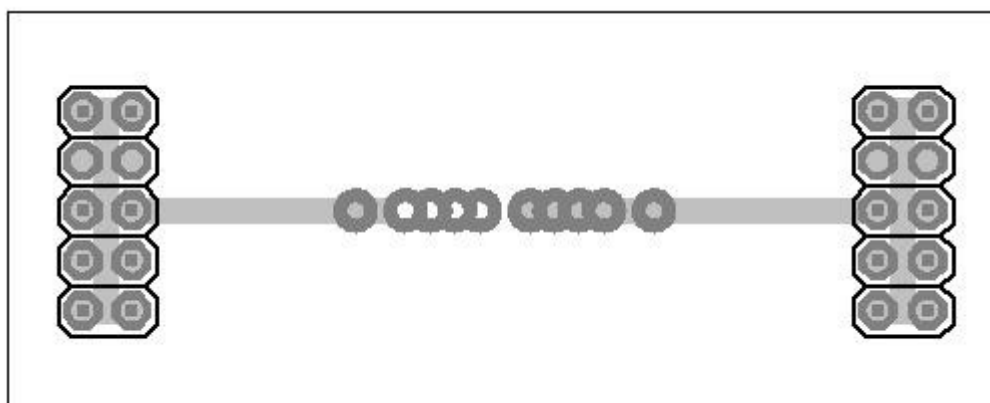
V případě zapojení obvodu galvanického oddělení se tento obvod zapojí mezi piny 1 a 10 (2 a 9) a mezi piny 3 a 8 (4 a 7). Piny 5 a 6 jsou připraveny pro případné měření stavu tranzistoru. Pokud bude tranzistor připojen přímo ke generátoru, pak je nutné propojit piny 1 a 10 (2 a 9) a piny 3 a 8 (4 a 7) na tomto konektoru.



Obr. č. 28 – Schematické zapojení konektoru pro galvanické oddělení

### 6.2.2 Univerzální modul

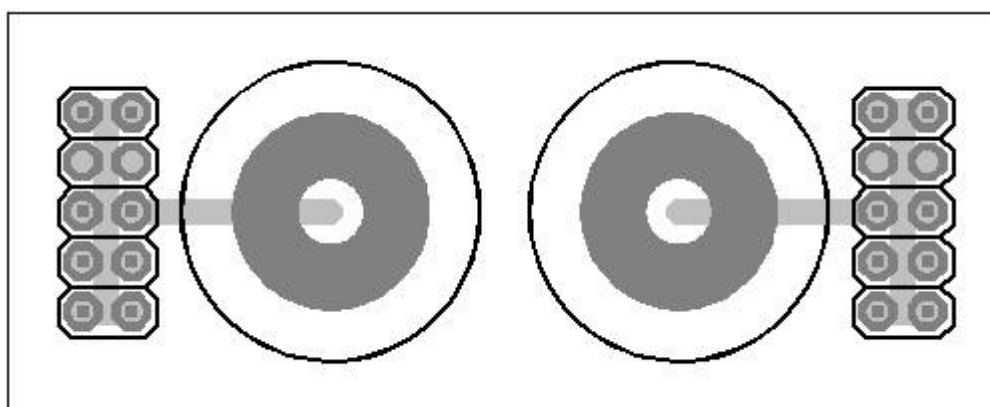
Tento modul byl navržen pro osazení většiny součástek měniče. Modul je stejně jako ostatní navržen na desce plošných spojů o rozměrech 20 x 50 mm. Deska je osazena dvěma konektory pro připojení k univerzálnímu panelu. Mezi těmito konektory je několik pájecích bodů s různou roztečí. Toto řešení umožňuje osazení více typy součástek, kterými jsou diody, rezistory, kondenzátory nebo indukčnosti. Řešení univerzálního modulu bylo zvoleno s ohledem na různorodost součástek a možnost výběru a osazení součástky vhodné k zapojení vybraného měniče. Jedinou úpravou, kterou je potřebné provést při osazování, je zvětšení otvoru podle průměru nožičky osazované součástky. Návrh desky plošného spoje univerzálního modulu je na obrázku č. 29.



Obr. č. 29 – Návrh desky plošného spoje univerzálního modulu

### 6.2.3 Modul pro připojení zátěže

Vzhledem k větším výkonovým ztrátám a možnosti nastavení zátěže měniče byl dodatečně navržen modul osazený banánkovými konektory pro připojení externí zátěže v podobě nastavitelného výkonového rezistoru. Jedná se v podstatě o redukci mezi konektory univerzálního panelu a banánkovými konektory k připojení proměnného rezistoru. Návrh desky plošného spoje tohoto modulu je na obrázku č. 30.



Obr. č. 30 – Návrh desky plošného spoje modulu pro připojení zátěže

### 6.2.4 Možnosti úpravy modulů

Při měření vlastností měničů sestavených z modulů na univerzálním panelu byly zjištěny menší problémy při připojování měřících přístrojů. Pro účely měření by bylo vhodné umístit na jednotlivé moduly měřící body pro připojení měřících přístrojů, čímž by se zjednodušila práce při měřeních. Vhodná úprava modulu by spočívala v umístění vývodů nebo testovacích špiček pro připojení sondy osciloskopu. Pro měření proudu by bylo vhodné navrhnout nástavce mezi modul a univerzální panel na klešťovou sondu nebo osadit modul maličkým bočníkem pro napěťovou sondu.



## 7 Měření sestaveného snižujícího DC/DC měniče

K ověření funkcí generátoru a univerzálního panelu bylo zvoleno měření na snižujícím DC/DC měniči. Při tomto měření se ověřovala platnost rovnic pro výpočet výstupního napětí měniče ve spojitém a nespojitém módu, (11) a (12).

$$U_{OUT} = U_{IN} \cdot \frac{t_{ON}}{T} = U_{IN} \cdot D \quad (11)$$

$$U_{OUT} = U_{IN} \cdot \frac{1}{\frac{2 \cdot L \cdot I_0}{U_{IN} \cdot D^2 \cdot T} + 1} \quad (12)$$

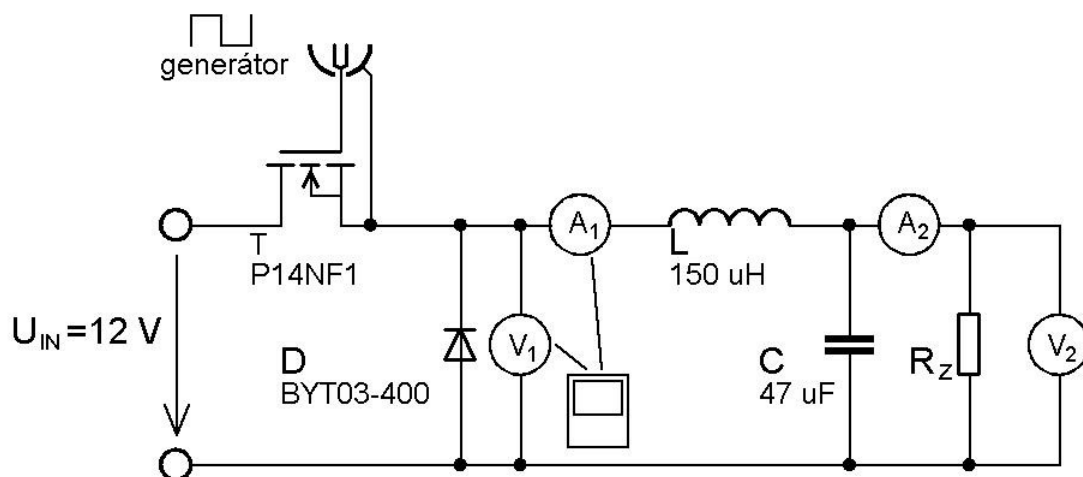
K určení, zda jde o spojitý nebo nespojitý mód, byl použit osciloskop, kterým se měřil průběh napětí na diodě, na druhý kanál osciloskopu byla připojena proudová sonda a snímal se průběh proudu indukčností. V případě, že proud induktorem klesl na nulu, jednalo se o nespojitý mód.

Aby bylo možné udržet měnič ve spojitém módu, musel být výstup měniče dostatečně zatížen. Při měření a ověřování rovnice pro spojitý mód byl výstup měniče zatížen rezistorem  $R_{Z2}$  nastaveným na hodnotu odporu  $5 \Omega$ . Při měření nespojitého módu musela být naopak zátěž snížena, na výstup byl tedy zapojen rezistor  $R_{Z1}$ , který byl nastaven  $100 \Omega$ .

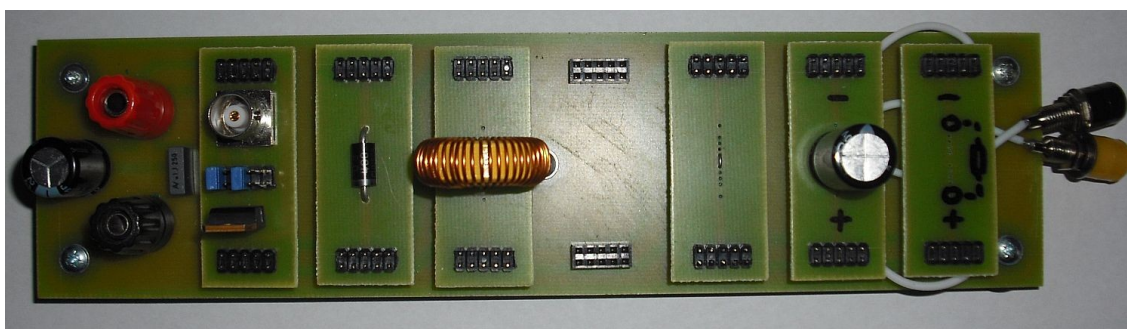
Schéma měřeného měniče je na obrázku č. 31. Zapojení univerzálního panelu zobrazuje obrázek č. 32. Rezistor označený jako  $R_z$  nebyl z důvodu vyšších výkonových ztrát zapojen jako modul. Pro připojení rezistorů s proměnným odporem a větším výkonem byl použit modul s banánkovými konektory.

Jako zdroj pro spínání unipolárního tranzistoru sloužil navržený generátor obdélníkového průběhu napětí s proměnnou střídou a frekvencí. Frekvence generátoru pro měření spojitého módu byla nastavena na 20 kHz, v případě nespojitého módu byla frekvence nastavena na 10 kHz. Střída byla nastavována v obou měřeních od 10 do 90 %. Krok nastavení byl zvolen 5 %, aby se dosáhlo dostatečného počtu bodů v grafu.

Vstupní napětí v obou módech bylo nastaveno na 12 V, v obou měřeních byla použita tlumivka s indukčností 150  $\mu\text{H}$  a kondenzátor o kapacitě 47  $\mu\text{F}$ .



**Obr. č. 31 – Schéma měření snižujícího měniče**



**Obr. č. 32 – Zapojení modulů na univerzálním panelu**

Seznam použitých měřících přístrojů a jejich označení je uvedeno v tabulce č. 2. Jeden z kanálů osciloskopu byl zapojen jako voltmetr  $V_1$ , druhý pomocí proudové sondy jako ampérmetr  $A_1$ . Voltmetrem  $V_2$  bylo měřeno výstupní napětí na zátěži, ampérmetr  $A_2$  měřil výstupní proud, který tekł do zátěže. Hodnota výstupního proudu je nezbytná pro výpočet výstupního napětí v nespojitém módu.

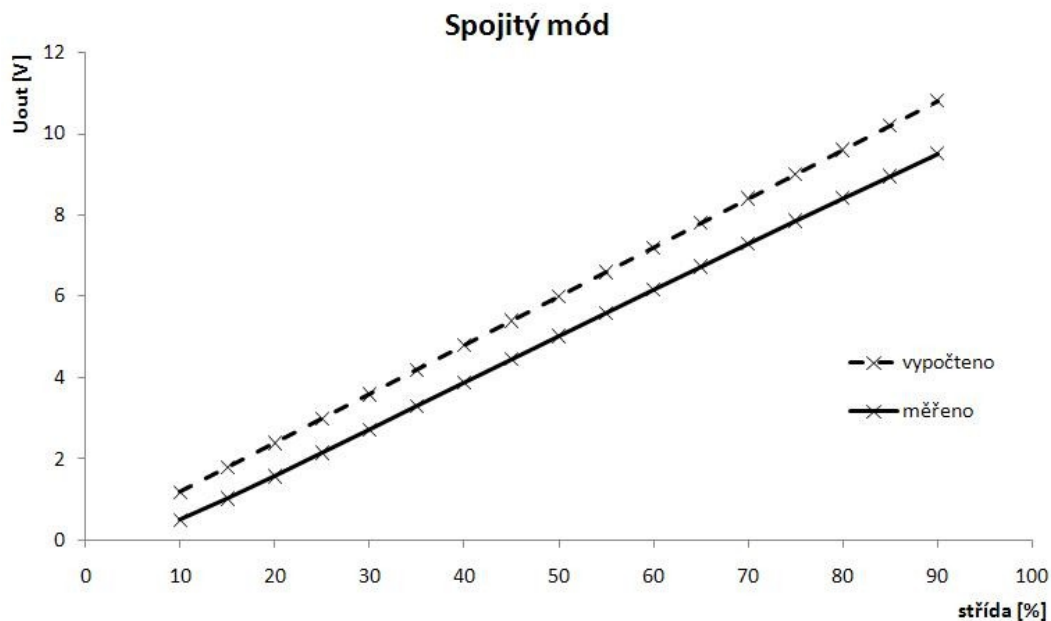
přístroj	výrobce	typ	inventární číslo
zdroj	Matrix	MPS-3003L-3	
ampérmetr	Mastech	MS 8218	DM 401 700
voltmetr	Chauvin Arnoux	C.A 5289	DM 402 396
osciloskop	Agilent Technologies	DSO 3062A	DM 500 361
proud. sonda	LEM HEME	PR30	
Rz1	Metra	105 W/1,6 A	DM 601 765
Rz2	Metra	2x6,7 W/10 A	

**Tab. č. 2 – Seznam použitých přístrojů**

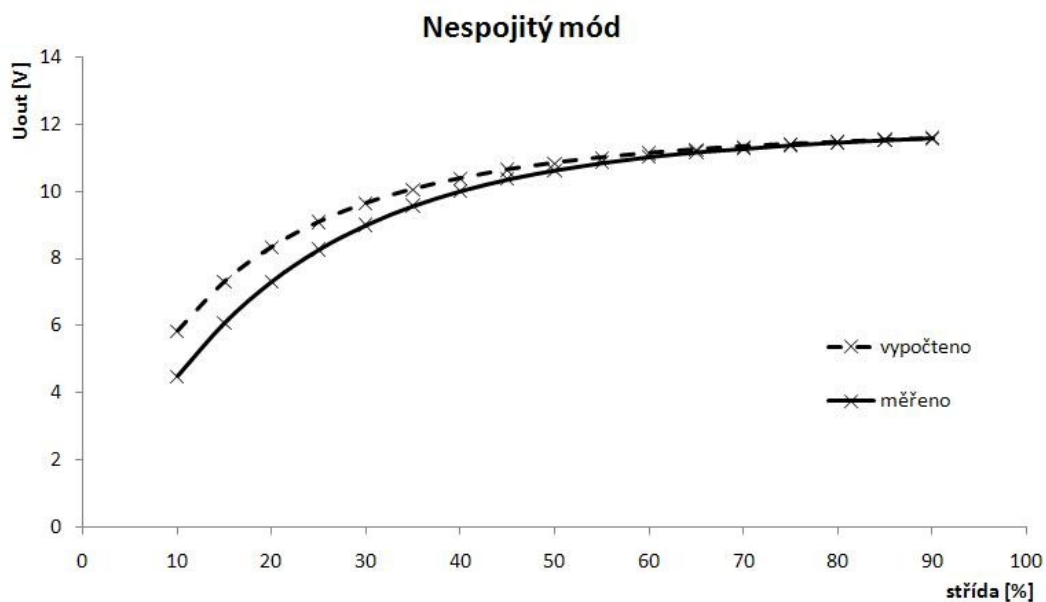
Naměřené a vypočtené hodnoty měření na snižujícím měniči v obou módech činnosti udává tabulka č. 3. Porovnání teoretických a naměřených hodnot výstupního napětí v závislosti na nastavené střídě spínání v jednotlivých módech zobrazují grafy na obrázcích č. 33 a č. 34.

střída [%]	spojitý mód		nespojité mód		
	U <sub>out</sub> [V] vypočtené	U <sub>out</sub> [V] naměřené	I <sub>out</sub> [mA]	U <sub>out</sub> [V] vypočtené	U <sub>out</sub> [V] naměřené
10	1,2	0,53	42,31	5,83	4,5
15	1,8	1,05	57,7	7,31	6,09
20	2,4	1,6	70,2	8,34	7,32
25	3	2,17	80,15	9,09	8,27
30	3,6	2,74	87,9	9,65	9
35	4,2	3,32	94,16	10,07	9,57
40	4,8	3,89	99,1	10,39	10,01
45	5,4	4,46	103,1	10,65	10,36
50	6	5,03	106,37	10,85	10,63
55	6,6	5,6	109,1	11,01	10,85
60	7,2	6,17	111,3	11,14	11,03
65	7,8	6,73	113,12	11,25	11,17
70	8,4	7,3	114,85	11,34	11,27
75	9	7,86	116,17	11,41	11,38
80	9,6	8,41	117,32	11,47	11,46
85	10,2	8,95	118,35	11,53	11,53
90	10,8	9,5	119,3	11,57	11,59

**Tab. č. 3 – Naměřené a vypočtené hodnoty**



**Obr. č. 33 – Graf výstupního napětí měniče ve spojitém módu**



**Obr. č. 34 – Graf výstupního napětí měniče v nespojitém módu**

Z grafů prezentujících výsledky měření je patrné, že naměřené hodnoty výstupního napětí jsou blízké hodnotám výstupního napětí vyčteným podle výše uvedených vzorců. Rozdíly mezi předpokládanými a naměřenými hodnotami jsou způsobeny úbytky napětí na zapojených součástkách, zejména na diodě D a na vinutí indukčnosti L. Uvedené vzorce platí pro ideální součástky.

## 8 Závěr

Výsledkem diplomové práce je modulární systém pro ověřování funkcí základních prvků výkonové elektroniky. Modulární systém se skládá z generátoru obdélníkového průběhu napětí a z univerzálního panelu pro sestavení základních DC/DC měničů s indukčností.

Navržený a sestavený generátor umožňuje nastavit frekvenci pulzů v rozmezí od 5 kHz do 50 kHz. Na generátoru se nenastavuje přímo frekvence, ta je vypočtena z periody, která se nastavuje lineárně v rozmezí od 20  $\mu$ s do 200  $\mu$ s s krokem po 5  $\mu$ s. Volbu mezi lineárním nastavováním periody nebo frekvence lze provést změnou ve zdrojovém kódu. Střidu pulzů lze nastavit v rozmezí od 10 % do 90 %. Krok nastavování střidy je 0,5 %. Nastavenou frekvenci a střidu lze zobrazit na čtyřmístném LED displeji. Další funkcí generátoru je možnost nastavit jeho dva výstupy do režimů PUSH-PULL a HALF-BRIDGE. V režimu HALF-BRIDGE jsou výstupy opatřeny časovým zpožděním náběžných hran, aby v případě jejich použití nemohlo v aplikaci dojít ke zkratu, například sepnutím dvou tranzistorů v jeden okamžik. Tyto režimy lze volit tlačítkem určeným k jejich přepínání. Zvolený režim je indikován dvěma LED diodami. Výstupní napětí generátoru je o úrovních  $\pm 12$  V.

Univerzální panel, který je druhou částí diplomové práce, umožňuje sestavit pomocí modulů celkem pět typů DC/DC měničů s indukčností. Na tomto panelu lze sestavit snižující měnič (buck), zvyšující měnič (boost), invertující měnič (buck-boost), zvyšující/snižující měnič (ČUK) a měnič SEPIC. Panel má celkem sedm pozic pro zapojení jednotlivých modulů. Základními moduly pro sestavu měničů je modul spínače s unipolárním tranzistorem, modul pro osazení součástkami, kterými jsou rezistory, kondenzátory, indukčnosti a diody, a modul s banánkovými konektory pro připojení výkonového rezistoru jako zátěže. Jednotlivé moduly se do panelu zapojují pomocí dutinových konektorů. Vstupní napětí panelu je omezeno osazeným filtračním kondenzátorem, jehož maximální napětí je 160 V.

Nedílnou součástí diplomové práce je technická dokumentace pro další výrobu modulárního systému, ta je v podobě schémat a návrhů desek plošných spojů vytvořená v programu Eagle 4.15, zdrojových kódů pro mikroprocesor a hradlové pole. Další částí práce jsou návody k použití jednotlivých částí systému a vzorové úlohy. Technická dokumentace a zdrojové kódy jsou umístěny na přiloženém CD-ROM.

Tento modulární systém je funkčním vzorkem, na němž očekávám další úpravy. Především jde o úpravy napájecího zdroje, osazení zdroje transformátorem o vyšším výkonu a zakomponování invertujícího měniče pro větev 3,3 V. Další úpravou generátoru je dotažení části pro připojení generátoru k počítači přes sériovou linku. Vytvoření galvanického oddělení sériové linky a vytvoření zdrojového kódu k její obsluze. V oblasti univerzálního panelu pro sestavu DC/DC měničů by bylo vhodné zvážit uspořádání jednotlivých modulů na panelu a přiblížit ho více k topologii těchto měničů. Jednotlivé moduly by bylo vhodné doplnit o měřicí body, pro snazší připojení měřících přístrojů. V neposlední řadě je potřebné vytvořit galvanické oddělení generátoru od modulu spínače pro sestavení měničů. Ten měl být na modulu tranzistoru, ale bude lepší ho přesunout do generátoru. Další možností úpravy generátoru je zapojení A/D převodníku mikroprocesoru, který by šlo využít jako zpětnou vazbu pro sestavené měniče.

Věřím, že tato diplomová práce bude sloužit k názorným ukázkám a měřením ve výuce výkonové elektroniky a přinese studentům více poznatků v oblasti DC/DC měničů.

Diplomová práce může dále sloužit jako výchozí bod k dalším modifikacím a rozšiřováním modulárního systému. Možností rozšíření systému je například vytvoření modulů a přípravků pro sestavení DC/DC měničů s transformátory, ke kterým je již generátor připraven.

## Seznam literatury

- [1] ANDREJS Filip. *Ovládací panel laboratorního zdroje*. Semestrální projekt. Liberec, Technická Univerzita v Liberci, 2008.
- [2] ATMEL. *ATmega8 (L), 8bit AVR with 8K Bytes In-System Programmable Flash* [online]. Datasheet. 2008. [cit. 2009-05-20].  
URL: <[www.atmel.cy/dzn/resources/prod\\_documents/doc2486.pdf](http://www.atmel.cy/dzn/resources/prod_documents/doc2486.pdf)>.
- [3] AYYANAR Raja. *Arizona State University: Power Electronics* [online]. [cit. 2009-05-20].  
URL: <[enpub.fulton.asu.edu/powerelectronics](http://enpub.fulton.asu.edu/powerelectronics)>.
- [4] ČERNÍK Martin. *Výkonové polovodičové spínače a výkonová elektronika* [online]. Pracovní verze. Liberec, Technická Univerzita v Liberci, 2008. [cit. 2009-05-20].  
URL: <[www.mti.tul.cz/files/vke/powersemi\\_short.pdf](http://www.mti.tul.cz/files/vke/powersemi_short.pdf)>.
- [5] FAKTOR Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. 1. vydání. Praha, BEN – technická literatura, 2002. 248 stran. ISBN 80-86056-91-0.
- [6] IXYS. *ISOSMART Half Bridge Driver Chipset: IXBD4412* [online]. Datasheet. 1998. [cit. 2009-05-20].  
URL:  
<[server.oersted.dtu.dk/ftp/database/Data\\_CDs/Component\\_data/INYX\\_1999/DATA/I.PDF](http://server.oersted.dtu.dk/ftp/database/Data_CDs/Component_data/INYX_1999/DATA/I.PDF)>.
- [7] KREJČIŘÍK Alexandr. *DC/DC Měniče*. 1. vydání. Praha, BEN – technická literatura, 2001. 112 stran. ISBN 80-7300-045-8.
- [8] KREJČIŘÍK Alexandr. *Napájecí zdroje I, II, III*. Praha, BEN – technická literatura, 1998. ISBN 80-86056-56-2.

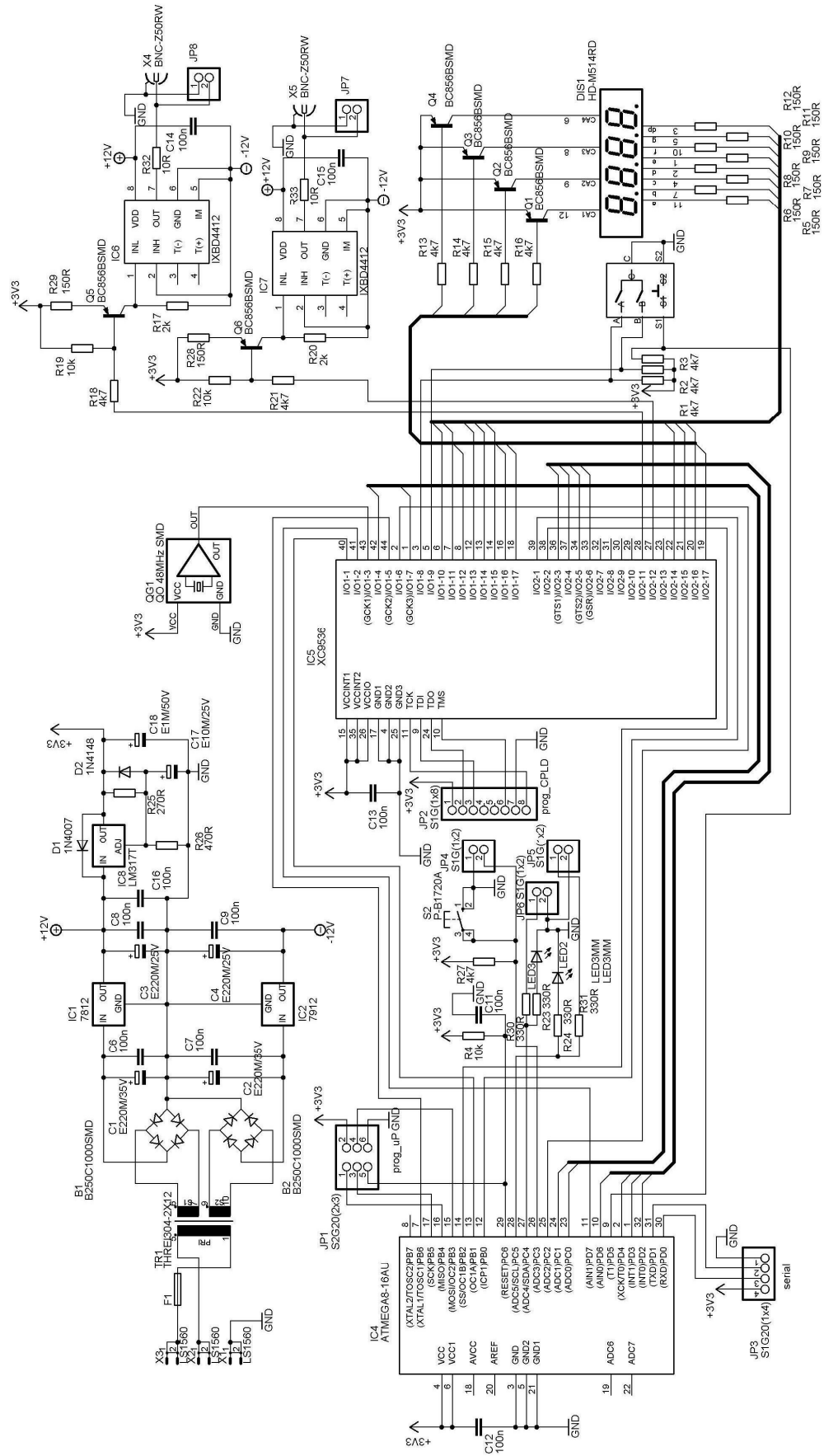
- [9] LINEAR TECHNOLOGY. *LT1170 / LT1171 / LT1172, High Efficiency Switching Regulators* [online]. Datasheet. 1991. [cit. 2009-05-20].  
URL: <[cds.linear.com/docs/Datasheet/117012ff.pdf](http://cds.linear.com/docs/Datasheet/117012ff.pdf)>.
- [10] MATOUŠEK David. *Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR ATmega16*. 1. vydání. Praha, BEN – technická literatura, 2006. 320 stran. ISBN 80-79300-174-8.
- [11] PUNČOCHÁŘ Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. 5. vydání. Praha, BEN – technická literatura, 2005. 496 stran. ISBN 80-7300-059-8.
- [12] VONDRÁŠEK František. *Výkonová elektronika: Měníče s vlastní komutací a bez komutace*. 1. vydání. Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni, 2001. 252 stran. ISBN 80-7082-485-9.
- [13] XILINX. *XC9536 XL, High Performance CPLD* [online]. Datasheet. 2007. [cit. 2009-05-20].  
URL: <[www.xilinx.com/support/documentation/data\\_sheets/ds058.pdf](http://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds058.pdf)>.



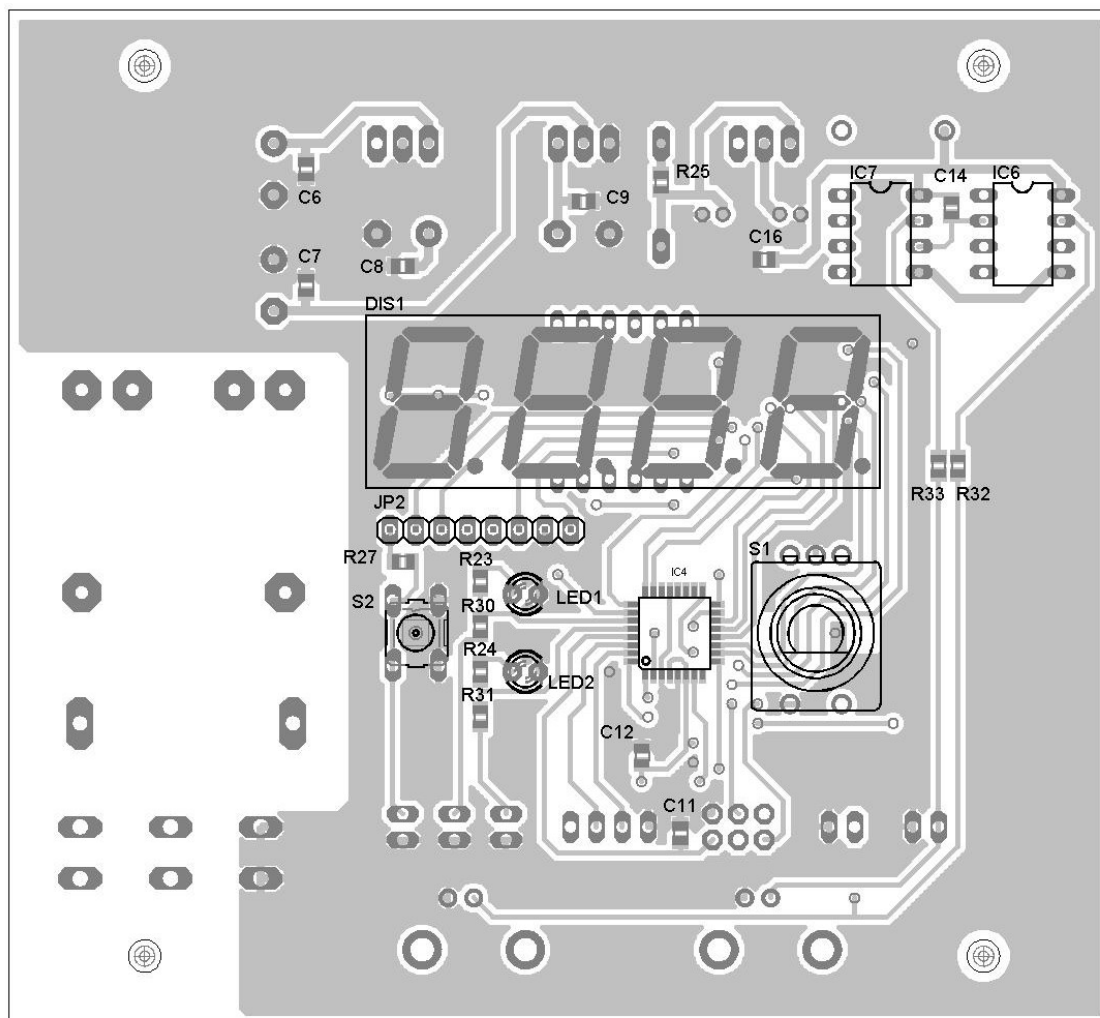
## Seznam příloh

Příloha A: Schéma generátoru.....	50
Příloha B: Osazovací plán TOP strany DPS generátoru.....	51
Příloha C: Osazovací plán BOTTOM strany DPS generátoru.....	52
Příloha D: Fotografie generátoru.....	53
Příloha E: Schéma a osazovací plán a fotografie univerzálního panelu .....	54
Příloha F: Schéma, osazovací plán Top a Bottom strany modulu spínače .....	55
Příloha G: Osazovací plán Bottom strany univerzálního modulu .....	55
Příloha H: Schéma, osazovací plán Top a Bottom strany modulu pro připojení zátěže. 55	
Příloha I: Ukázka části zdrojového kódu mikroprocesoru.....	56
Příloha J: Ukázka části zdrojového kódu hradlového pole .....	57
Příloha K: Návod k použití generátoru obdélníkového průběhu napětí .....	58
Příloha L: Návod k použití univerzálního panelu.....	60
Příloha M: Vzorová úloha č. 1 .....	62
Příloha N: Vzorová úloha č. 2 .....	64
Příloha O: Vzorová úloha č. 3 .....	67

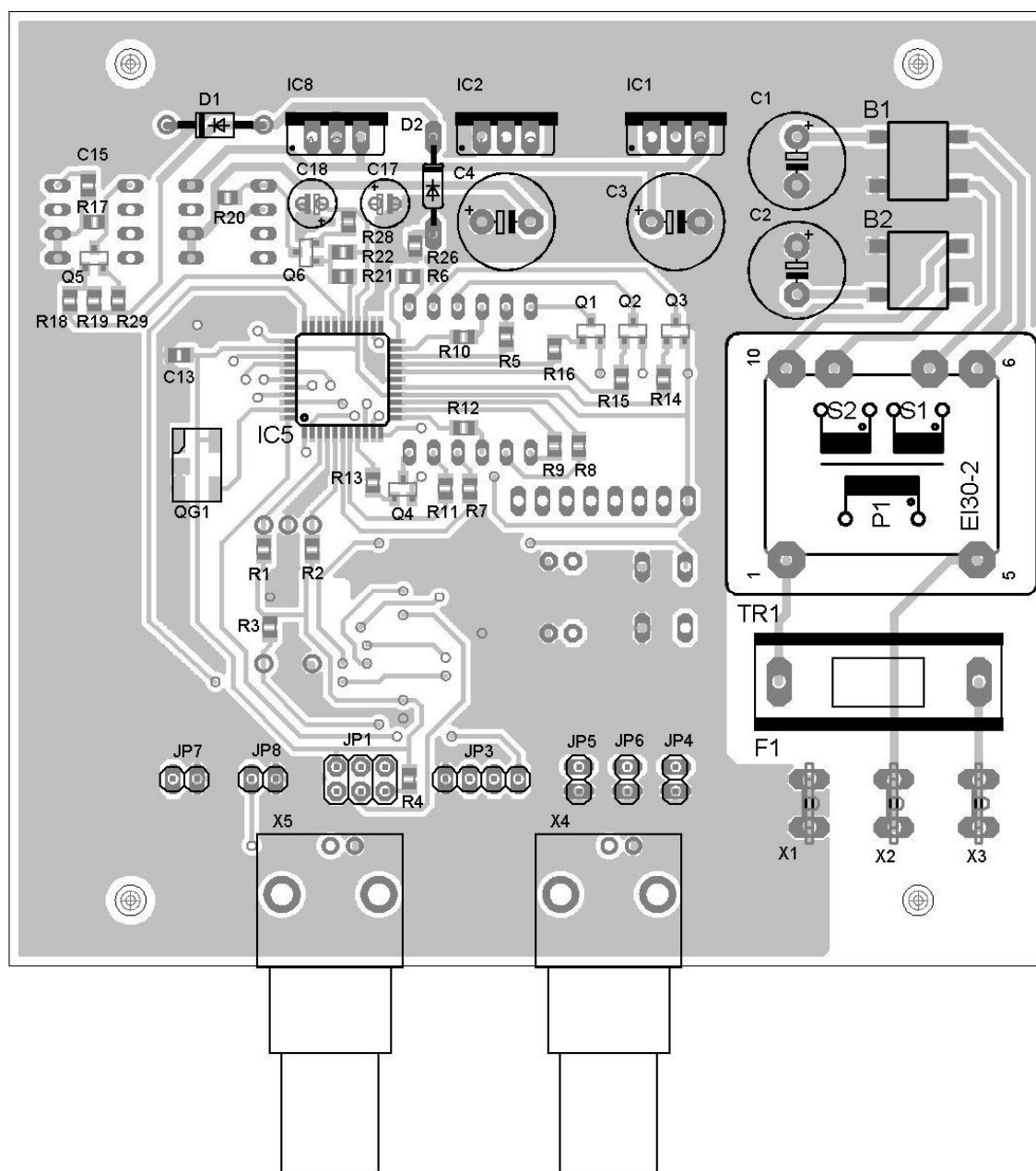
## Příloha A: Schéma generátoru



Příloha B: Osazovací plán TOP strany DPS generátoru



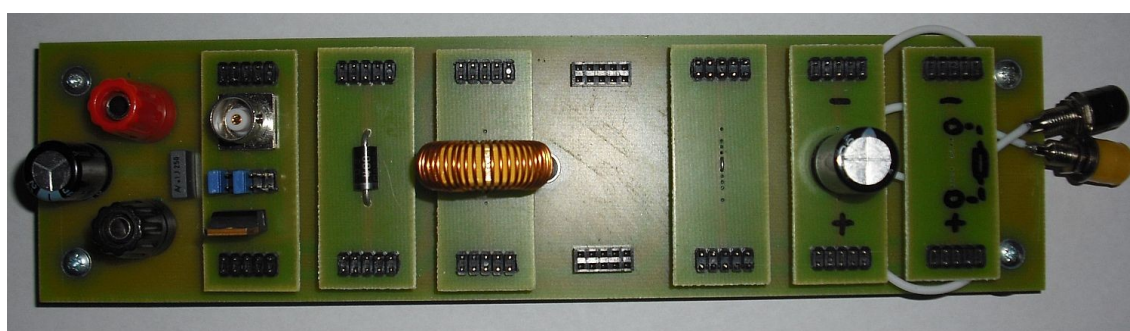
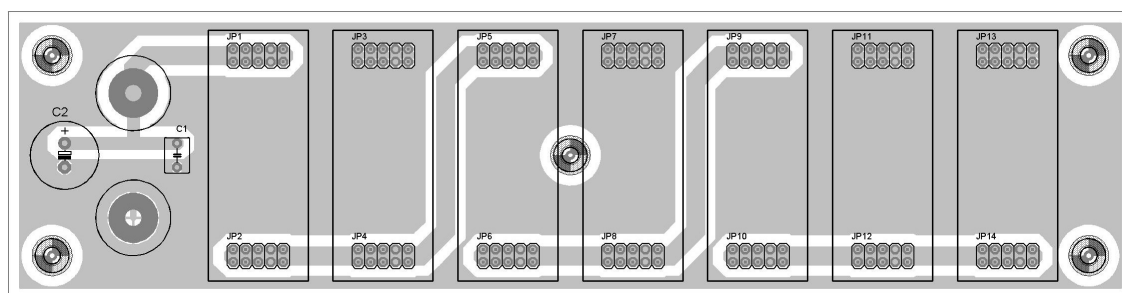
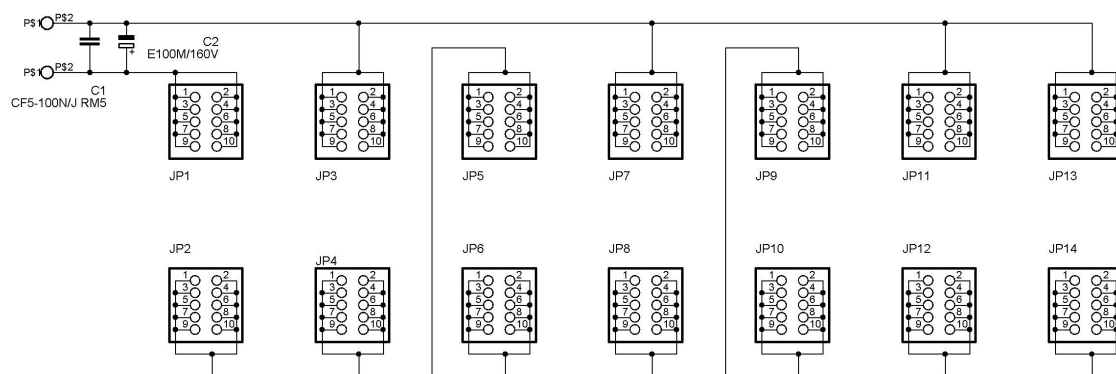
Příloha C: Osazovací plán BOTTOM strany DPS generátoru



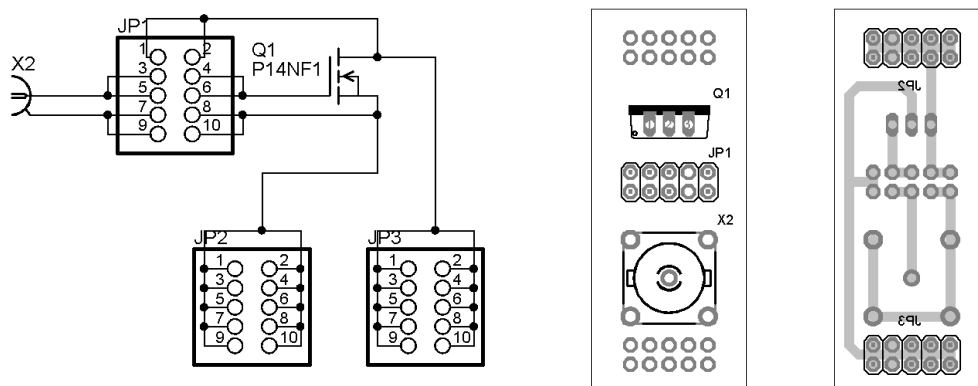
Příloha D: Fotografie generátoru



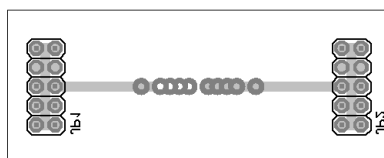
## Příloha E: Schéma a osazovací plán a fotografie univerzálního panelu



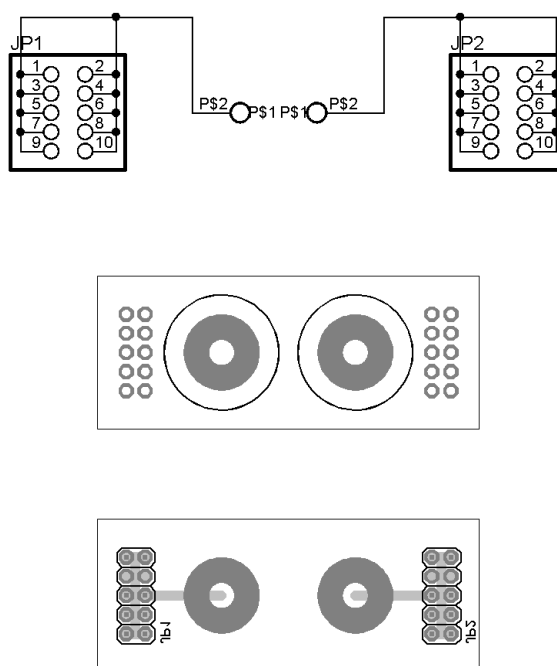
## Příloha F: Schéma, osazovací plán Top a Bottom strany modulu spínače



## Příloha G: Osazovací plán Bottom strany univerzálního modulu



Příloha H: Schéma, osazovací plán Top a Bottom strany modulu pro připojení zátěže



## Příloha I: Ukázka části zdrojového kódu mikroprocesoru

```
//-----  
// HLAVNI FUNKCE  
//-----  
//-----  
int main(void)  
{  
  
    init_uchip();           // Inicializace I/O bran uP  
    init_PWM();            // Pocatecni nastaveni citace pro PWM  
    //-----  
    // Pocatecni nastaveni rezimu na HALFBRIDGE  
  
    clear_bit(SELECT_CPLD_PORT_W, SELECT_CPLD_HBPP);  
    clear_bit(SELECT_HBPP_PORT_W, SELECT_HBPP_PP);  
    set_bit(SELECT_HBPP_PORT_W, SELECT_HBPP_HB);  
    //-----  
    // Pocatecni nastaveni pro zobrazeni na displeji  
  
    disp_sel=0;  
    disp_number=freq;  
    //-----  
    // Nastaveni pocatecniho stavu rotacniho koderu  
  
        ink=0;  
        if (bit_is_set(IRC_A_PORT_R, IRC_A))  
            ink=ink+1;  
        if (bit_is_set(IRC_B_PORT_R, IRC_B))  
            ink=ink+2;  
        p_last=ink;  
        last=ink;  
    //-----  
    // Hlavni smycka programu (nekonecna)  
    //-----  
    while (1)  
    {  
        select_disp();      // Volani funkce pro zjisteni prepnuti zobrazeni na LED displeji  
  
        select_hbpp();      // Volani funkce pro zjisteni prepnuti mezi rezimy HB a PP  
  
        inkr_cidlo();        // Volani funkce pro obsluhu rotačního koderu  
  
        zobraz_hodnotu(disp_number,disp_sel); // Volani funkce pro zobrazeni na displeji  
  
        set_PWM(); // Volani funkce pro nastaveni hodnot citace/časovače v rezimu PWM  
    }  
}
```



## Příloha J: Ukázka části zdrojového kódu hradlového pole

"delicka kmitoctu pro uP (1/4) - z 48 MHz na 12 MHz

```
D1.CLK=cpld_clk;  
D2.CLK=cpld_clk;  
D1.D=!D2.Q;  
D2.D=D1.Q;  
cpu_clk=D2.Q;
```

"propojeni IRC s uP

```
out_ircA=ircA;  
out_ircB=ircB;
```

"dekoder pro sedmisegmentovku (0-9,F,P)

```
when (cislice==0) then segmentovka = ^B0000001;  
when (cislice==1) then segmentovka = ^B1001111;  
when (cislice==2) then segmentovka = ^B0010010;  
when (cislice==3) then segmentovka = ^B0000110;  
when (cislice==4) then segmentovka = ^B1001100;  
when (cislice==5) then segmentovka = ^B0100100;  
when (cislice==6) then segmentovka = ^B0100000;  
when (cislice==7) then segmentovka = ^B0001111;  
when (cislice==8) then segmentovka = ^B0000000;  
when (cislice==9) then segmentovka = ^B0000100;  
when (cislice==10) then segmentovka = ^B0111000;  
when (cislice==11) then segmentovka = ^B0011000;  
when (cislice==12) then segmentovka = ^B1111111;
```

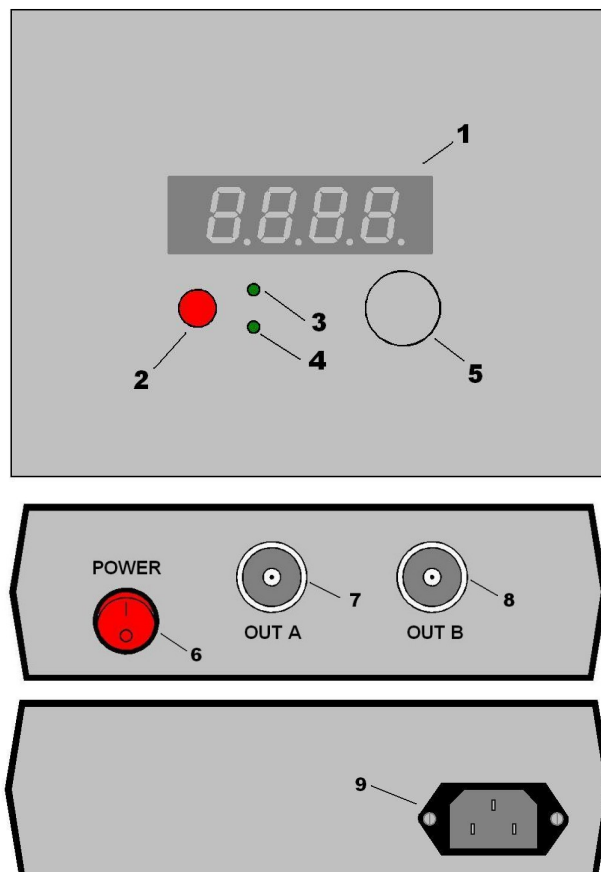
"dekoder pro anody LED displeje

```
when (pozice==0) then anody = ^B0111;  
when (pozice==1) then anody = ^B1011;  
when (pozice==2) then anody = ^B1101;  
when (pozice==3) then anody = ^B1110;
```

"rozsviceni tecky u druhe a ctvrté sedmisegmentovky

```
when ((anody==^B1110)#(anody==^B1011)) then dp=0; else dp=1;
```

## Návod k použití generátoru obdélníkové průběhu napětí



- 1 – čtyřmístný displej pro zobrazení nastavené frekvence / střídý
- 2 – tlačítko (HB/PP) pro přepínání režimů Half-Bridge a Push-Pull
- 3 – LED pro signalizaci zvoleného režimu Half-Bridge
- 4 – LED pro signalizaci zvoleného režimu Push-Pull
- 5 – rotační kodér pro nastavení frekvence/střídý/tlačítko pro volbu zobrazení na displeji
- 6 – síťový vypínač
- 7 – BNC konektor – výstup A
- 8 – BNC konektor – výstup B
- 9 – síťový konektor

## 1. Uvedení do provozu

Po připojení konektoru (9) pomocí napájecího kabelu k síti a uvedením vypínače (6) do polohy I dojde k zapnutí generátoru. Po zapnutí generátoru je automaticky nastaven režim výstupů do režimu Half-Bridge, hodnota frekvence na 5 kHz, hodnota střídání na 50 %. Hodnota na displeji (1) zobrazuje aktuální nastavenou frekvenci (signalizuje první znak – F).

## 2. Nastavení frekvence

Pokud chceme nastavovat frekvenci, zmačknutím rotačního kodéru (5) zvolíme, aby se na displeji (1) zobrazovala frekvence (první pozice displeje udává informaci F.). Otáčením rotačního kodéru (5) přidáváme nebo ubíráme frekvenci.

Pozn.: V případě nastavování frekvence jde vlastně o nastavování periody, frekvence je pouze vypočtena z nastavené periody. Krok nastavení periody je 2  $\mu$ s.

## 3. Nastavení střídání

Pro nastavení střídání zvolíme zmačknutím rotačního kodéru (5), aby se na displeji (1) zobrazovala střídání (první pozice displeje udává informaci P.). Otáčením rotačního kodéru (5) zvětšujeme nebo snižujeme střídání. Krok nastavení střídání je po 0,5 %.

## 4. Volba režimů výstupu

Režimy výstupů OUT A (7) a OUT B (8) volíme tlačítkem (2). Lze přepínat mezi režimy Half-Bridge a Push-Pull. Režim Half-Bridge indikuje LED (3), režim Push-Pull indikuje LED (4).

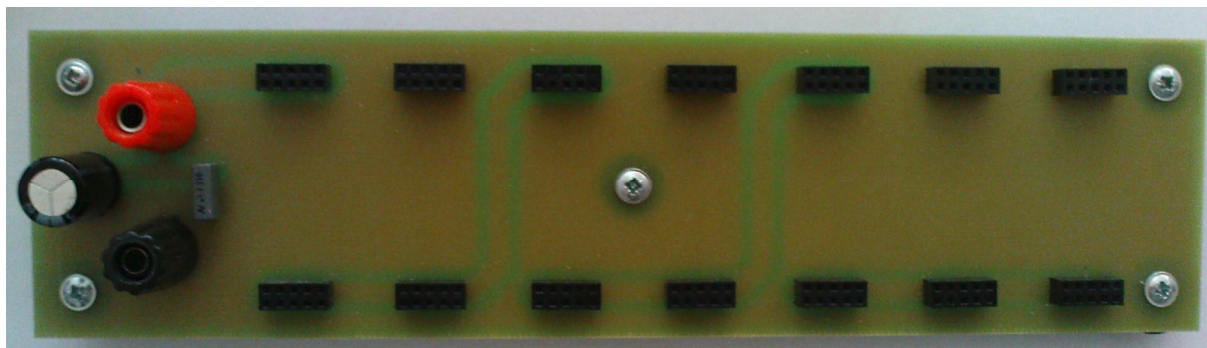
## 5. Úroveň výstupního napětí výstupů OUT A a OUT B

Napětí na výstupech OUT A (7) a OUT B (8) je o úrovních  $\pm 12$  V.

## 6. Čtyřmístný LED displej

První symbol na displeji (1) signalizuje, zda se aktuálně zobrazuje hodnota frekvence nebo střídání, frekvenci značí symbol F a střídání symbol P (angl. Pulse Ratio). Od hodnoty zvolené veličiny je tento symbol oddělen tečkou. Další tři symboly (číslíky) udávají hodnotu zvolené veličiny. V případě frekvence je hodnota v jednotkách kHz s jedním desetinným místem odděleným tečkou, v případě střídání je hodnota v % také s jedním desetinným místem odděleným tečkou.

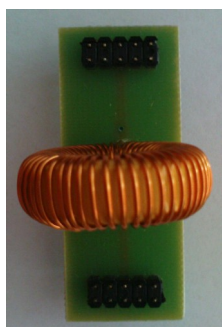
## Návod k použití univerzálního panelu



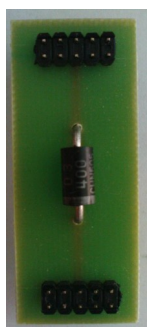
1



2



3



4



5



6



7

1 – hlavní panel pro sestavování DC/DC měničů

2 – modul spínače

3 – modul s indukčností

4 – modul s diodou

5 – modul s kondenzátorem

6 – modul zkratu

7 – modul konektoru pro připojení zátěže

### 1. Zapojení jednotlivých modulů

Všechny moduly se zapojují pomocí konektorových kolíků, které jsou osazeny na jednotlivých modulech a pomocí dutinkové lišty osazené na univerzálním panelu. Rozteč konektorů je všude stejná, lze tedy moduly libovolně skládat na panel.

## 2. Univerzální panel

Panel je osazen dutinovými konektory s jednotnou roztečí pro připojení jednotlivých modulů. Vstupní napětí se na panel přivádí přes dva banánkové konektory. Kladný pól na červený konektor, záporný pól na černý konektor. Maximální vstupní napětí panelu je omezeno filtračním a vyhlazovacím kondenzátorem a činí 160 V.

## 3. Modul spínače

Řídící signál se na tento modul přivádí přes BNC konektor. Kromě konektorů pro zapojení modulu do panelu je tento modul osazen konektorem pro připojení obvodu pro galvanické oddělení generátoru od měniče. V případě, že se nepoužije obvod pro galvanické oddělení, musí se propojit piny konektoru podle obrázku (2). Při zapojování měniče na univerzálním panelu je nutné dodržovat polaritu a modul zapojit podle přiloženého návodu.

## 4. Modul s indukčností

Tento modul je osazen cívkou s indukčností 150  $\mu\text{H}$  nebo 600  $\mu\text{H}$ . Lze zapojit na libovolnou pozici panelu. U tohoto modulu není třeba dodržovat polaritu.

## 5. Modul s diodou

Modul je osazen diodou BYT 03-400. S mezní hodnotou proudu 3 A a mezní hodnotou napětí 400 V. Při zapojování měniče na univerzálním panelu je nutné dodržovat polaritu a modul zapojit podle přiloženého návodu.

## 6. Modul s kondenzátorem

Modul je osazen kondenzátorem o kapacitě 47  $\mu\text{F}$ . Mezní hodnota napětí tohoto kondenzátoru je 250 V. Při zapojování měniče na univerzálním panelu je nutné dodržovat polaritu a modul zapojit podle přiloženého návodu.

## 7. Modul zkratu

Tento modul slouží k propojování v případě potřeby neosazené pozice na panelu. U tohoto modulu není potřeba dodržovat polaritu, jde o čistý propoj.

## 8. Modul konektoru pro připojení zátěže

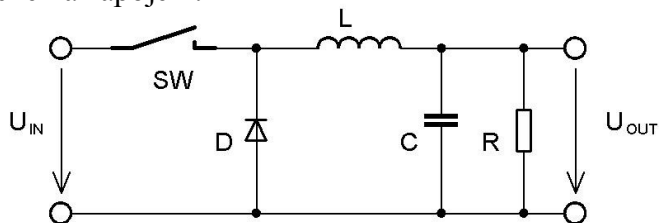
Modul slouží k připojení výkonového rezistoru jako zátěže. Rezistor lze připojit pomocí banánkových konektorů. V případě dodržení barevného značení konektorů je nezbytné dodržet polaritu při zapojení a modul zapojit podle přiloženého návodu.

### **Důležité upozornění:**

**Před připojením napájecího zdroje pro vstupní napětí sestaveného měniče pečlivě zkontrolujte zapojení a ujistěte se, že na výstup měniče je připojena dostatečná zátěž !!!**

## Úloha č. 1 – Měření na Snižujícím DC/DC měnič

Schéma zapojení:



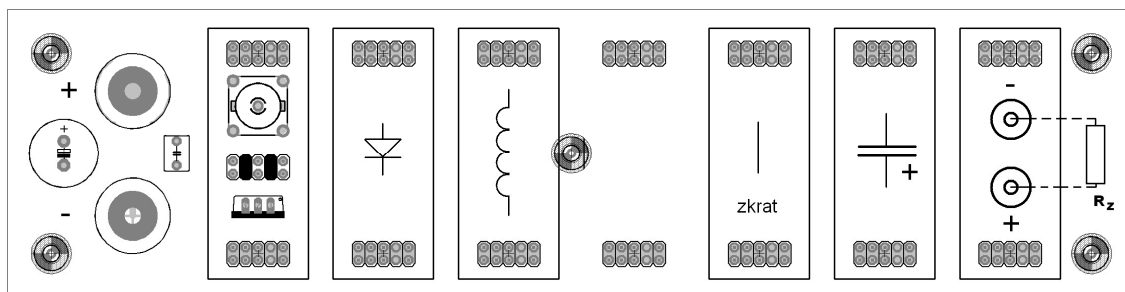
Spojitéj mód:

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{t_{ON}}{T} = D$$

Nespojitéj mód:

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{1}{\frac{2 \cdot L \cdot I_0}{U_{IN} \cdot D^2 \cdot T} + 1}$$

Zapojení univerzálního panelu:



- 1) Zapojte na univerzálním panelu pomocí modulů snižující měnič BUCK, schéma a zapojení panelu pro měnič BUCK viz výše. Dbejte při tom na polaritu jednotlivých modulů.
- 2) Modul spínače připojte pomocí BNC konektoru a koaxiálního kabelu ke generátoru obdélníkového průběhu napětí na výstup OUT A.
- 3) Na výstup měniče připojte pomocí modulu s banánkovými konektory proměnný výkonový rezistor o hodnotě 100 Ω.
- 4) Pečlivě zkontrolujte zapojení.
- 5) Na vstupní konektory panelu přiveďte ze stejnosměrného zdroje napětí 12 V. (dodržujte polaritu – kladný pól na červený konektor, záporný pól na černý konektor)
- 6) Zapněte generátor, nechte ho v režimu Half-Bridge.
- 7) Ověřte rovnice pro výpočet výstupního napětí měniče jak pro spojitý tak i nespojitéj mód.
  - Měřte výstupní proud do zátěže a napětí na zátěži.
  - Pro zjištění módu měniče použijte osciloskop a snímejte napětí na anodě zapojené diody.
  - Pro měření jednotlivých módů nastavte velikost zátěže. Spojitý mód – větší zátěž, nespojitéj mód – menší zátěž. Případně nastavte frekvenci.
  - Krok střidy zvolte s ohledem na počet bodů grafu.
- 8) Výsledky graficky zpracujte a uveďte vyhodnocení

Naměřené a vypočtené hodnoty:

střída [%]	spojitý mód				nespojité mód			
	Iout [A]	Uout [V] vypočtené	Uout [V] naměřené	ΔUout [V]	Iout [mA]	Uout [V] vypočtené	Uout [V] naměřené	ΔUout [V]
10	0,11	1,2	0,53	0,67	42,31	5,83	4,5	1,33
15	0,21	1,8	1,05	0,75	57,7	7,31	6,09	1,22
20	0,32	2,4	1,6	0,8	70,2	8,34	7,32	1,02
25	0,43	3	2,17	0,83	80,15	9,09	8,27	0,82
30	0,55	3,6	2,74	0,86	87,9	9,65	9	0,65
35	0,66	4,2	3,32	0,88	94,16	10,07	9,57	0,5
40	0,78	4,8	3,89	0,91	99,1	10,39	10,01	0,38
45	0,89	5,4	4,46	0,94	103,1	10,65	10,36	0,29
50	1,01	6	5,03	0,97	106,37	10,85	10,63	0,22
55	1,12	6,6	5,6	1	109,1	11,01	10,85	0,16
60	1,23	7,2	6,17	1,03	111,3	11,14	11,03	0,11
65	1,35	7,8	6,73	1,07	113,12	11,25	11,17	0,08
70	1,46	8,4	7,3	1,1	114,85	11,34	11,27	0,07
75	1,57	9	7,86	1,14	116,17	11,41	11,38	0,03
80	1,68	9,6	8,41	1,19	117,32	11,47	11,46	0,01
85	1,79	10,2	8,95	1,25	118,35	11,53	11,53	0
90	1,9	10,8	9,5	1,3	119,3	11,57	11,59	-0,02

Spojité mód:  $U_{in}=12\text{ V}$ ,  $f=20\text{ kHz}$ ,  $L=150\text{ }\mu\text{H}$ ,  $R=5\text{ }\Omega$

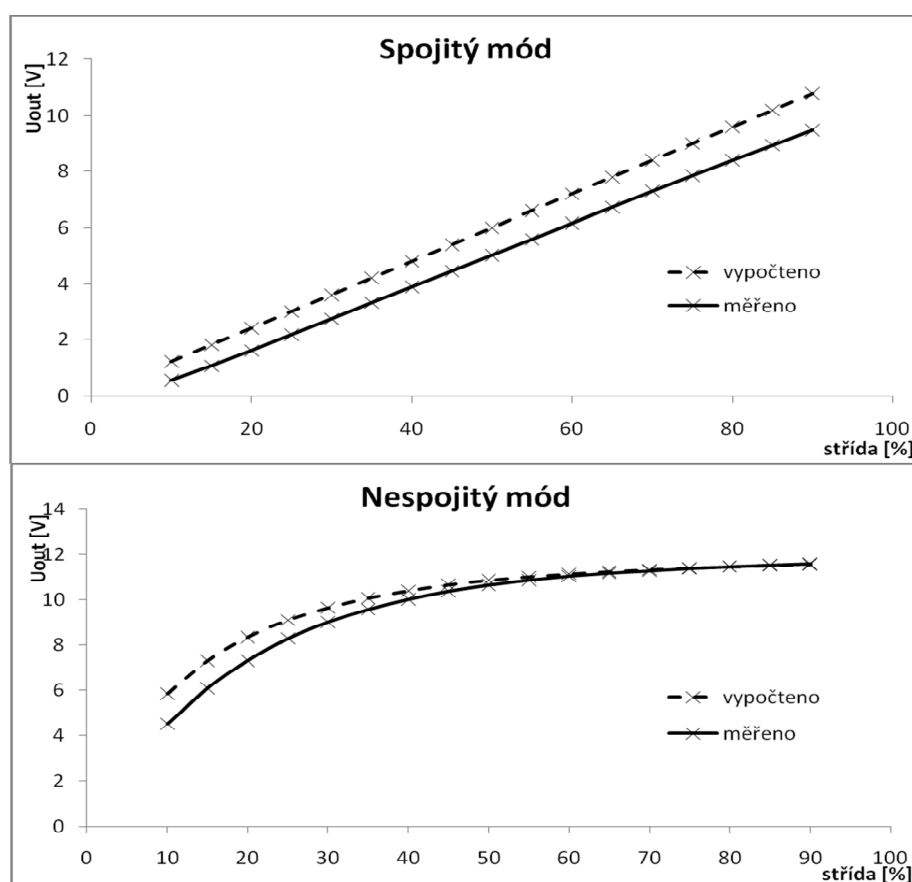
Nespojité mód:  $U_{in}=12\text{ V}$ ,  $f=10\text{ kHz}$ ,  $L=150\text{ }\mu\text{H}$ ,  $R=100\text{ }\Omega$

Příklady výpočtů pro spojitý a nespojité mód:

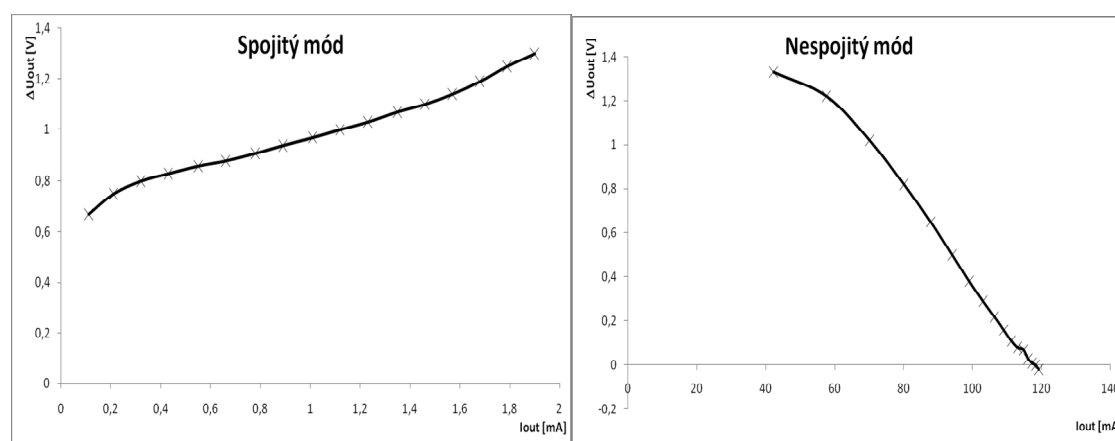
$$U_{OUT} = U_{IN} \cdot \frac{t_{ON}}{T} = U_{IN} \cdot D = 12 \cdot 0,75 = 9\text{ V}$$

$$U_{OUT} = U_{IN} \cdot \frac{1}{\frac{2 \cdot L \cdot I_0}{U_{IN} \cdot D^2 \cdot T} + 1} = 12 \cdot \frac{1}{\frac{2 \cdot 150 \cdot 10^{-6} \cdot 0,116}{12 \cdot 0,75^2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}} + 1} = 11,41\text{ V}$$

Grafické zpracování výsledků:



Grafy závislosti rozdílů naměřených a vypočtených hodnot výstupního napětí na výstupním proudu:



Zhodnocení:

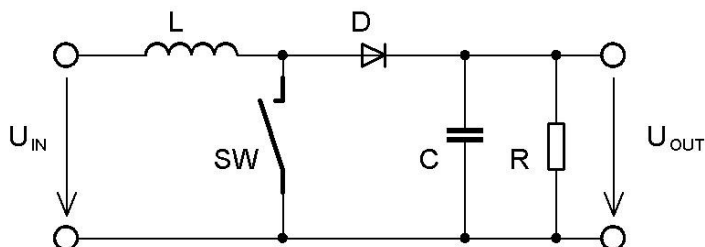
Rozdíly mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami výstupního napětí měniče jsou způsobeny neideálními součástkami, zejména úbytkem napětí na diodě, úbytkem napětí na vinutí cívky a parazitními kapacitami jednotlivých součástek.

Příloha N: Vzorová úloha č. 2



## Úloha č. 2 – Měření na zvyšujícím DC/DC měniči

Schéma zapojení:



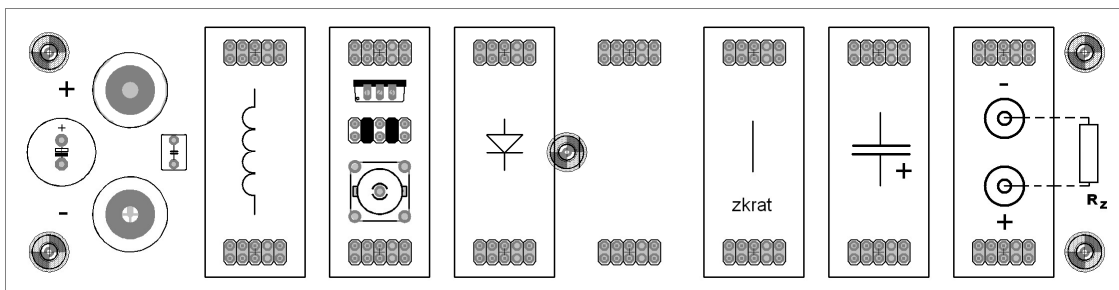
Spojitéj mód:

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{1}{1 - \frac{t_{on}}{T}} = \frac{1}{1 - D}$$

Nespojitýj mód:

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = 1 + \frac{U_{in} \cdot D^2 \cdot T}{2 \cdot L \cdot I_{out}}$$

Zapojení univerzálního panelu:



- 1) Zapojte na univerzálním panelu pomocí modulů zvyšující měnič BOOST, schéma a zapojení panelu pro měnič BOOST viz výše. Dbejte při tom na polaritu jednotlivých modulů.
  - 2) Modul spínače připojte pomocí BNC konektoru a koaxiálního kabelu ke generátoru obdélníkového průběhu napětí na výstup OUT A.
  - 3) Na výstup měniče připojte pomocí modulu s banánkovými konektory proměnný výkonový rezistor o hodnotě 100 Ω.
  - 4) Pečlivě zkontrolujte zapojení.
  - 5) Na vstupní konektory panelu přiveďte ze stejnosměrného zdroje napětí 2 V. (dodržujte polaritu – kladný pól na červený konektor, záporný pól na černý konektor)
  - 6) Zapněte generátor, nechte ho v režimu Half-Bridge.
  - 7) Ověřte rovnice pro výpočet výstupního napětí měniče jak pro spojitý tak i nespojitéj mód.
    - Měřte výstupní proud do zátěže a napětí na zátěži.
    - Pro zjištění módu měniče použijte osciloskop a snímejte napětí modulu spínače.
    - Pro měření jednotlivých módů nastavte velikost zátěže. Spojitý mód – větší zátěž, nespojitéj mód – menší zátěž. Případně nastavte frekvenci.
    - Krok střidy zvolte s ohledem na počet bodů grafu.
  - 8) Výsledky graficky zpracujte a uveďte vyhodnocení
- Naměřené a vypočtené hodnoty:

střída [%]	spojitý mód				nespojité mód			
	Iout [mA]	Uout [V] vypočtené	Uout [V] naměřené	ΔUout [V]	Iout [mA]	Uout [V] vypočtené	Uout [V] naměřené	ΔUout [V]
10	35,56	2,22	1,6	0,62	17,6	2,76	1,96	0,8
15	38,44	2,35	1,73	0,62	21,54	3,39	2,4	0,99
20	41,56	2,5	1,87	0,63	25,6	4,08	2,84	1,24
25	45,11	2,67	2,03	0,64	29,6	4,82	3,28	1,54
30	49,33	2,86	2,22	0,64	33,57	5,57	3,71	1,86
35	53,78	3,08	2,42	0,66	37,51	6,35	4,15	2,2
40	58,22	3,33	2,62	0,71	41,38	7,16	4,57	2,59
45	64	3,64	2,88	0,76	45,19	7,97	4,98	2,99
50	70,67	4	3,18	0,82	48,96	8,81	5,39	3,42
55	79,11	4,44	3,56	0,88	52,7	9,65	5,8	3,85
60	89,33	5	4,02	0,98	56,32	10,52	6,19	4,33
65	101,78	5,71	4,58	1,13	59,93	11,4	6,59	4,81
70	118,22	6,67	5,32	1,35	63,52	12,29	6,97	5,32
75	138,44	8	6,23	1,77	67,11	13,18	7,36	5,82
80	165,11	10	7,43	2,57	77,15	13,06	8,46	4,6
85	196,44	13,33	8,84	4,49	98,6	11,77	10,81	0,96
90	222,89	20	10,03	9,97	129,83	10,32	14,22	-3,9

Spojité mód:  $U_{in}=2\text{ V}$ ,  $f=20\text{ kHz}$ ,  $L=150\text{ }\mu\text{H}$ ,  $R=45\text{ }\Omega$

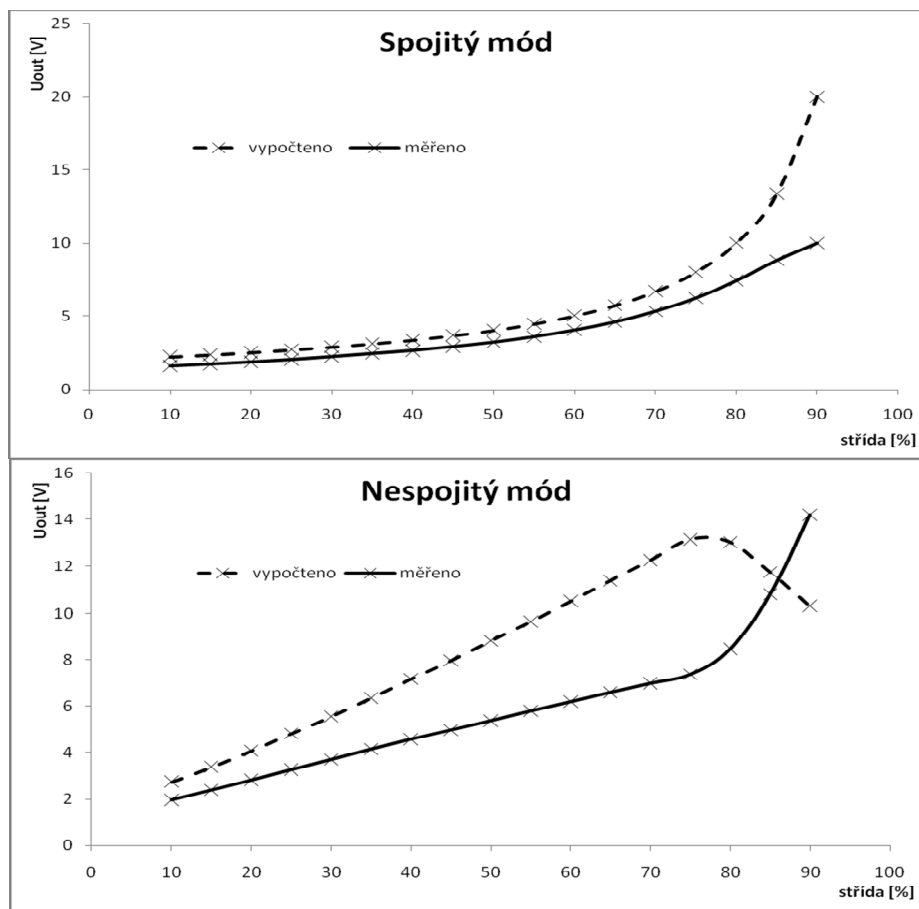
Nespojité mód:  $U_{in}=2\text{ V}$ ,  $f=10\text{ kHz}$ ,  $L=150\text{ }\mu\text{H}$ ,  $R=110\text{ }\Omega$

Příklady výpočtů pro spojitý a nespojité mód:

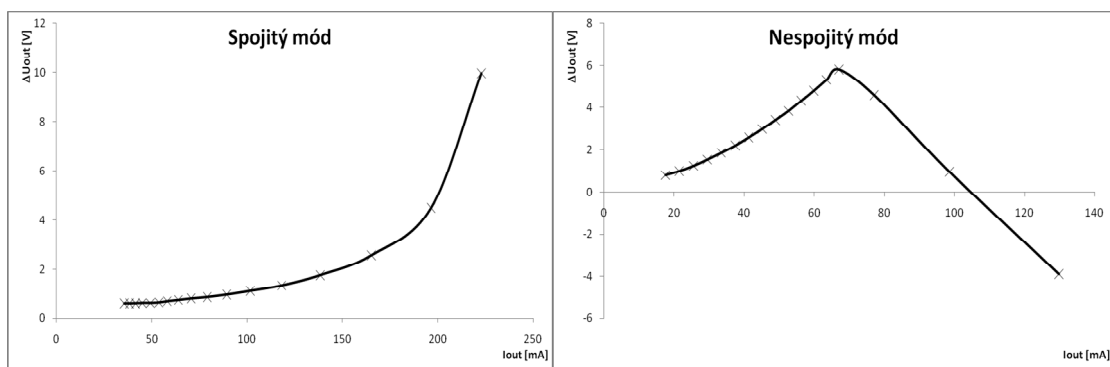
$$U_{OUT} = U_{IN} \cdot \frac{1}{1 - \frac{t_{on}}{T}} = U_{IN} \cdot \frac{1}{1 - D} = 2 \cdot \frac{1}{1 - 0,5} = 4\text{ V}$$

$$U_{OUT} = U_{IN} \cdot \left( 1 + \frac{U_{in} \cdot D^2 \cdot T}{2 \cdot L \cdot I_{out}} \right) = 2 \cdot \left( 1 + \frac{2 \cdot 0,5^2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 150 \cdot 10^{-6} \cdot 48,96 \cdot 10^{-3}} \right) = 8,81\text{ V}$$

Grafické zpracování výsledků:



Grafy závislosti rozdílů naměřených a vypočtených hodnot výstupního napětí na výstupním proudu:



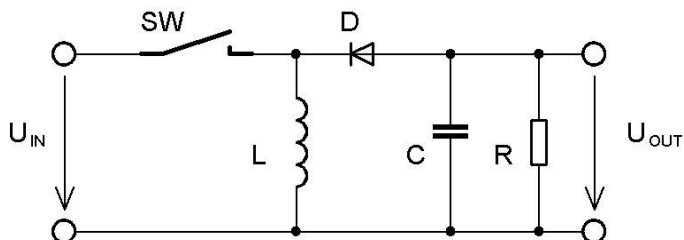
Zhodnocení:

Rozdíly mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami výstupního napětí měniče jsou způsobeny neideálními součástkami, zejména úbytkem napětí na diodě, úbytkem napětí na vinutí cívky a parazitními kapacitami jednotlivých součástek.

Příloha O: Vzorová úloha č. 3

## Úloha č. 3 – Měření na invertujícím DC/DC měniči

Schéma zapojení:



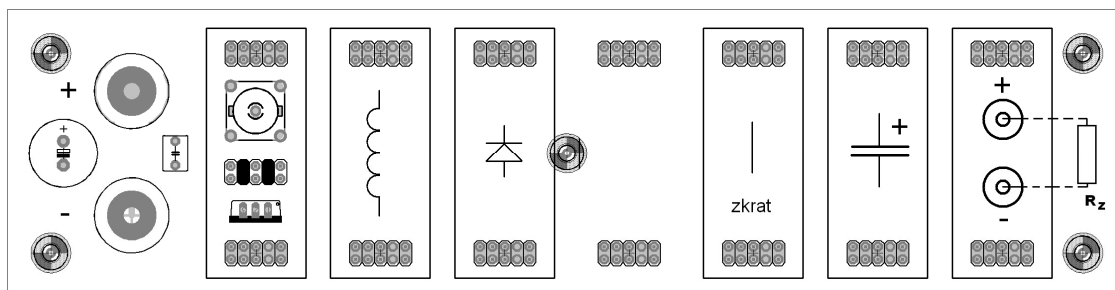
Spojitéj mód:

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = -\frac{D}{1-D}$$

Nespojitýj mód:

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = -\frac{U_{in} \cdot D^2 \cdot T}{2 \cdot L \cdot I_{out}}$$

Zapojení univerzálního panelu:



- 1) Zapojte na univerzálním panelu pomocí modulů invertující měnič BUCK-BOOST, schéma a zapojení panelu pro invertující měnič viz výše. Dbejte při tom na polaritu jednotlivých modulů.
  - 2) Modul spínače připojte pomocí BNC konektoru a koaxiálního kabelu ke generátoru obdélníkového průběhu napětí na výstup OUT A.
  - 3) Na výstup měniče připojte pomocí modulu s banánkovými konektory proměnný výkonový rezistor o hodnotě 100 Ω.
  - 4) Pečlivě zkontrolujte zapojení.
  - 5) Na vstupní konektory panelu přiveďte ze stejnosměrného zdroje napětí 3,5 V. (dodržujte polaritu – kladný pól na červený konektor, záporný pól na černý konektor)
  - 6) Zapněte generátor, nechte ho v režimu Half-Bridge.
  - 7) Ověřte rovnice pro výpočet výstupního napětí měniče jak pro spojitý tak i nespojitéj mód.
    - Měřte výstupní proud do zátěže a napětí na zátěži.
    - Pro zjištění módu měniče použijte osciloskop a snímejte napětí na katodě diody.
    - Pro měření jednotlivých módů nastavte velikost zátěže. Spojitý mód – větší zátěž, nespojitéj mód – menší zátěž. Případně nastavte frekvenci.
    - Krok střídly zvolte s ohledem na počet bodů grafu.
  - 8) Výsledky graficky zpracujte a uveďte vyhodnocení
- Naměřené a vypočtené hodnoty:

střída [%]	spojitý mód				nespojité mód			
	I <sub>out</sub> [mA]	U <sub>out</sub> [V] vypočtené	U <sub>out</sub> [V] naměřené	ΔU <sub>out</sub> [V]	I <sub>out</sub> [mA]	U <sub>out</sub> [V] vypočtené	U <sub>out</sub> [V] naměřené	ΔU <sub>out</sub> [V]
10					14,57	-4,2	-1,42	2,78
15					22,27	-5,5	-2,17	3,33
20					29,64	-6,89	-2,88	4,01
25	9,4	-1,17	-0,63	0,54	36,82	-8,32	-3,57	4,75
30	13,28	-1,5	-0,89	0,61	43,86	-9,78	-4,25	5,53
35	18,21	-1,88	-1,22	0,66	50,71	-11,27	-4,91	6,36
40	24,18	-2,33	-1,62	0,71	57,49	-12,78	-5,56	7,22
45	31,19	-2,86	-2,09	0,77	64,16	-14,32	-6,19	8,13
50	39,85	-3,5	-2,67	0,83	70,7	-15,88	-6,82	9,06
55	50	-4,28	-3,35	0,93	77,17	-17,46	-7,44	10,02
60	62,54	-5,25	-4,19	1,06	83,54	-19,06	-8,04	11,02
65	78,36	-6,5	-5,25	1,25	89,86	-20,68	-8,64	12,04
70	98,51	-8,17	-6,6	1,57	96,1	-22,31	-9,23	13,08
75	124,78	-10,5	-8,36	2,14	102,32	-23,94	-9,82	14,12
80	159,25	-14	-10,67	3,33				
85	204,93	-19,83	-13,73	6,1				
90	254,48	-31,5	-17,05	14,45				

Spojitý mód: U<sub>in</sub>=3,5 V, f=50 kHz, L=600 μH, R=67 Ω

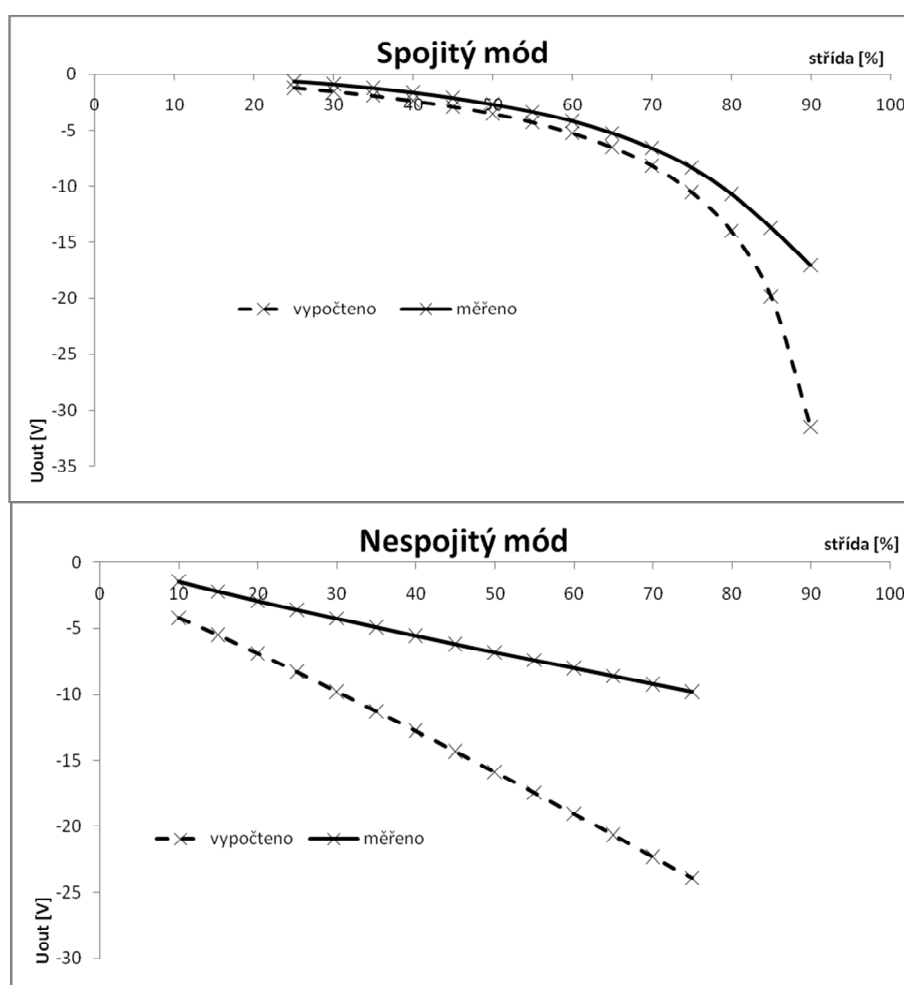
Nespojité mód: U<sub>in</sub>=3,5 V, f=10 kHz, L=150 μH, R=100 Ω

Příklady výpočtů pro spojitý a nespojité mód:

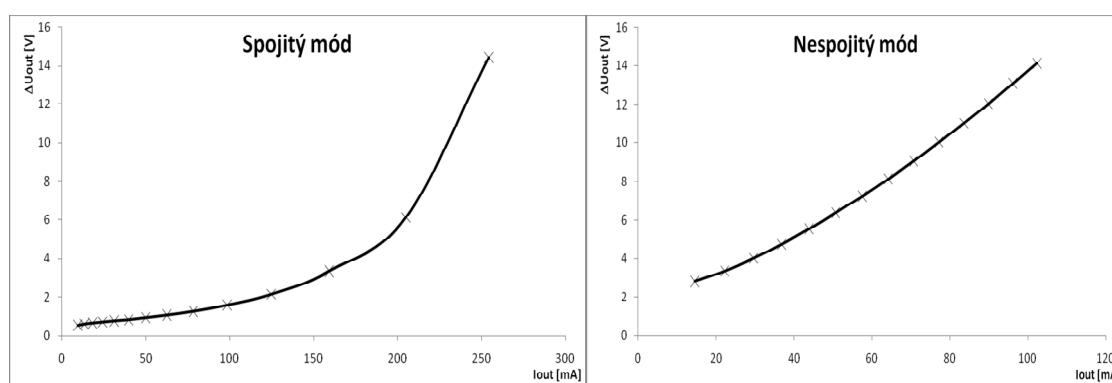
$$U_{OUT} = U_{IN} \cdot \left( -\frac{D}{1-D} \right) = 3,5 \cdot \left( -\frac{0,25}{1-0,25} \right) = -1,17 \text{ V}$$

$$U_{OUT} = U_{IN} \cdot \left( -\frac{U_{in} \cdot D^2 \cdot T}{2 \cdot L \cdot I_{out}} \right) = 3,5 \cdot \left( -\frac{3,5 \cdot 0,25^2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 150 \cdot 10^{-6} \cdot 36,82 \cdot 10^{-3}} \right) = -8,32 \text{ V}$$

Grafické zpracování výsledků:



Grafy závislosti rozdílů naměřených a vypočtených hodnot výstupního napětí na výstupním proudu:



Zhodnocení:

Rozdíly mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami výstupního napětí měniče jsou způsobeny neideálními součástkami, zejména úbytkem napětí na diodě, úbytkem napětí na vinutí cívky a parazitními kapacitami jednotlivých součástek.